



TUGAS AKHIR - TF 181801

**ANALISA KINERJA *HEAT RECOVERY STEAM*  
GENERATOR PADA PLTGU PJB GRESIK  
MELALUI SIMULASI BERBASIS JARINGAN  
SYARAF TIRUAN**

FUROIDAH CHILMI  
NRP. 0231154000078

Dosen Pembimbing  
Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T.  
Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA**  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2019









**TUGAS AKHIR - TF 181801**

**ANALISA KINERJA *HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR* PADA PLTGU PJB GRESIK MELALUI SIMULASI BERBASIS JARINGAN SYARAF TIRUAN**

FUROIDAH CHILMI  
NRP. 0231154000078

Dosen Pembimbing  
Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T.  
Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2019**





FINAL PROJECT - TF 181801

**PERFORMANCE ANALYSIS OF HEAT  
RECOVERY STEAM GENERATOR IN PJB  
GRESIK PLTGU THROUGH SIMULATION  
BASED ON NEURAL NEURAL NETWORK**

FUROIDAH CHILMI  
NRP. 0231154000078

*Supervisors*

Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T.  
Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA

**ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya  
2019**





## PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

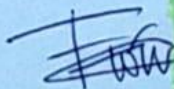
Nama : Furoidah Chilmi  
• NRP : 02311540000078  
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul **"ANALISA KINERJA HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR PADA PLTGU PJB GRESIK MELALUI SIMULASI BERBASIS JARINGAN SYARAF 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, 19 Juli 2019

Yang membuat



Furoidah Chilmi

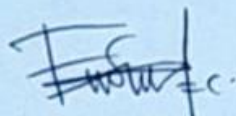
NRP. 02311540000078





**ANALISA KINERJA *HEAT RECOVERY STEAM*  
GENERATOR PADA PLTGU PJB GRESIK MELALUI  
SIMULASI BERBASIS JARINGAN SYARAF TIRUAN**

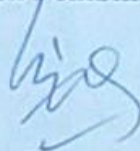
Oleh:



**Furoidah Chilmi**  
NRP.0231154000078

Surabaya, 19 Juli 2019  
Menyetujui,

Dosen Pembimbing I



**Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T.**  
NIPN. 19740815 199703 2 001

Dosen Pembimbing II



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

Mengetahui,  
Kepala Departemen  
Teknik Fisika FTI-ITS



**Agus Muhammad Putra, S.T., M.Si., Ph.D.**  
NIPN. 19780902 200312 1 002



**ANALISA KINERJA HEAT RECOVERY STEAM  
GENERATOR PADA PLTGU PJB GRESIK MELALUI  
SIMULASI BERBASIS JARINGAN SYARAF TIRUAN**



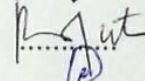
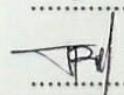
**TUGAS AKHIR**

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

Oleh:

**FUROIDAH CHILMI**  
**NRP. 0231154000078**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T. ....  (Pembimbing I)
2. Dr. Ir. Totok Sochartanto, DEA  (Pembimbing II)
3. Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.Kes.  (Penguji I)
4. Hendra Cordova, S.T., M.T. .... (Penguji II)
5. Iwan Cony Setiadi, S.T., M.T.  (Penguji III)

**SURABAYA**  
**19 Juli 2019**





# ANALISA KINERJA HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR PADA PLTGU PJB GRESIK MELALUI SIMULASI BERBASIS JARINGAN SYARAF TIRUAN

**Nama** : Furoidah Chilmi  
**NRP** : 0231154000078  
**Departemen** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing I** : Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T.  
**Dosen Pembimbing II** : Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA

## Abstrak

Panas buang yang dihasilkan oleh PLTG masih sangat tinggi yaitu sekitar  $500^{\circ}\text{C}$  sehingga menjadi potensi energi yang dapat dimanfaatkan untuk membuat *superheated steam* melalui *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG). Pada HRSG, terdapat tiga macam *equipment* utama yaitu *economizer*, *evaporator*, dan *superheater*. Digunakan metode analisa berbasis Jaringan Syaraf Tiruan yang mana hanya perlu mengetahui parameter inlet dan outlet *equipment* HRSG. Melalui pemodelan jaringan syaraf tiruan, nilai *Measurement Square Error* (MSE) yang dihasilkan bermacam-macam tiap *equipment*, *Preheater* memiliki nilai MSE sebesar  $9.75 \times 10^{-4}$ , LP *economizer* memiliki nilai MSE sebesar  $1.10 \times 10^{-3}$ , LP *evaporator* memiliki nilai MSE sebesar  $2.12 \times 10^{-4}$ , HP *economizer* memiliki nilai MSE sebesar  $3.91 \times 10^{-4}$ , HP *evaporator* memiliki nilai MSE sebesar  $4.22 \times 10^{-4}$  dan *superheater* memiliki nilai MSE sebesar  $3.45 \times 10^{-3}$ . Dengan nilai MSE tersebut, JST dapat melakukan prediksi kinerja HRSG dengan sangat baik. Efisiensi kinerja HRSG pada PLTGU mengalami perubahan tiap waktunya dengan nilai tertinggi 85% dan terendah 50%. Hal ini disebabkan adanya perubahan laju energi gas buang yang terjadi setiap saat.

**Kata kunci:** jaringan syaraf tiruan, *heat recovery steam generator*, MSE





# PERFORMANCE ANALYSIS OF HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR IN PJB GRESIK PLTGU THROUGH SIMULATION BASED ON NEURAL NEURAL NETWORK

**Name** : *Furoidah Chilmi*  
**NRP** : *0231154000078*  
**Departement** : *Teknik Fisika FTI-ITS*  
**1st Supervisors** : *Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T.*  
**2nd Supervisors** : *Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA*

## **Abstract**

*The waste heat produced by the PLTG is still very high, which is around 500° C, so it becomes an energy potential that can be used to make superheated steam through the Heat Recovery Steam Generator (HRSG). In HRSG, there are three main types of equipment, namely economizer, evaporator, and superheater. An analysis method based on Artificial Neural Networks is used which only needs to know the parameters of the inlet and outlet of the HRSG equipment. Through artificial neural network modeling, the value of the Measurement Square Error (MSE) produced by each equipment, the Preheater has an MSE value of  $9.75 \times 10^{-4}$ , the economizer LP has an MSE value of  $1.10 \times 10^{-3}$ , LP evaporator has an MSE value of  $2.12 \times 10^{-4}$ , the HP economizer has an MSE value of  $3.91 \times 10^{-4}$ , the HP evaporator has an MSE value of  $4.22 \times 10^{-4}$  and the superheater has an MSE value of  $3.45 \times 10^{-3}$ . With the MSE value, ANN can predict the HRSG performance very well. The efficiency of HRSG performance in PLTGU has changed every time with the highest value of 85% and the lowest 50%. This is due to a change in the energy rate of the exhaust gas that occurs at any time.*

**Keywords:** *neural network, heat recovery steam generator, MSE*



## KATA PENGANTAR

Puji syukur hadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **ANALISA KINERJA HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR PADA PLTGU PJB GRESIK MELALUI SIMULASI BERBASIS JARINGAN SYARAF TIRUAN**

Telah diperoleh banyak sekali bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan tugas akhir ini. Maka diucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Ibu Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing I yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA. selaku dosen pembimbing II yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
4. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA. selaku Kepala Laboratorium Workshop Instrumentasi tempat saya mengerjakan tugas akhir dan telah memberikan ilmu, petunjuk dan nasihat.
5. Bapak Dr. Gunawan Nugroho, ST. MT. selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama masa perkuliahan.
6. Ayah, mama, adik dan seluruh keluarga. Terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
7. Seluruh keluarga asisten Laboratorium Workshop Instrumentasi, terima kasih untuk semuanya.

8. Seluruh teman Tugas Akhir Laboratorium Workshop Instrumentasi dan Tugas Akhir, terima kasih untuk semuanya.
9. Seluruh teman-teman Departemen Teknik Fisika angkatan 2015, Transcendent Frontier, terima kasih untuk semuanya.
10. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Disadari bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 19 Juli 2019

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME</b> .....	iii
<b>Lembar Pengesahan I</b> .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Lembar Pengesahan II</b> .....	vii
<b>Abstrak</b> .....	ix
<i>Abstract</i> .....	xi
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xvii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xix
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	2
1.4 Batasan Masalah .....	3
<b>BAB II TEORI PENUNJANG</b> .....	5
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG).....	5
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) .....	7
2.3 <i>Heat Recovery Steam Generator (HRSG)</i> .....	9
2.4 Jaringan Syaraf Tiruan .....	15
2.5 <i>Root Mean Square Error (RMSE)</i> .....	25
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	27
3.1 Identifikasi Parameter Proses HRSG.....	27
3.2 Pengambilan data operasional HRSG.....	33
3.3 Persiapan data untuk <i>training</i> dan validasi.....	35
3.4 Pemodelan Dinamika HRSG menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan .....	36
<b>BAB IV ANALISA DATA</b> .....	39
4.1 Simulasi JST menggunakan Toolbox Simulink.....	39
4.2 Validasi .....	52

4.3 Analisa Kinerja HRSG.....	58
<b>BAB V_KESIMPULAN.....</b>	<b>61</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>63</b>
<b>LAMPIRAN A_DATA PROSES .....</b>	<b>65</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>	<b>77</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Proses kerja unit pembangkit turbin gas (Utama, 2013).....	6
<b>Gambar 2.2</b>	Siklus Brayton (Satria, 2013).....	7
<b>Gambar 2.3</b>	Diagram aliran proses PLTU (PJB).....	8
<b>Gambar 2.4</b>	Bagian HRSG di PLTGU (Nordin & Majid, 2015).....	10
<b>Gambar 2.5</b>	Kesetimbangan energi pada HRSG (Nordin & Majid, 2015) .....	11
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram alir penelitian.....	27
<b>Gambar 3.2</b>	Parameter HRSG (PJB).....	28
<b>Gambar 3.3</b>	<i>Mass flow rate</i> preheater .....	28
<b>Gambar 3.4</b>	<i>Mass flow rate lp economizer</i> .....	29
<b>Gambar 3.5</b>	<i>Mass flow rate lp evaporator</i> .....	30
<b>Gambar 3.6</b>	<i>Mass flow rate hp economizer</i> .....	30
<b>Gambar 3.7</b>	<i>Mass flow rate hp evaporator</i> .....	31
<b>Gambar 3.9</b>	Data input <i>pressure feed water</i> pada preheater..	33
<b>Gambar 3.10</b>	Data <i>training</i> dan validasi <i>pressure feed water</i> ..	35
<b>Gambar 3.11</b>	Arsitektur JST .....	37
<b>Gambar 4.1</b>	Performansi <i>preheater</i> .....	40
<b>Gambar 4.2</b>	Regresi <i>preheater</i> .....	40
<b>Gambar 4.3</b>	Performansi <i>lp economizer</i> .....	42
<b>Gambar 4.4</b>	Regresi <i>lp economizer</i> .....	42
<b>Gambar 4.5</b>	Performansi <i>lp evaporator</i> .....	44
<b>Gambar 4.6</b>	Regresi <i>lp evaporator</i> .....	44
<b>Gambar 4.7</b>	Performansi <i>HP Economizer</i> .....	46
<b>Gambar 4.8</b>	Regresi <i>HP Economizer</i> .....	46
<b>Gambar 4.9</b>	Performansi <i>HP evaporator</i> .....	48
<b>Gambar 4.10</b>	Grafik regresi <i>HP Evaporator</i> .....	48
<b>Gambar 4.11</b>	Grafik performansi <i>superheater</i> .....	50
<b>Gambar 4.12</b>	Grafik regresi <i>superheater</i> .....	50
<b>Gambar 4.13</b>	Perubahan nilai efisiensi hasil pemodelan JST ..	59





## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b>	Parameter HRSG.....	32
<b>Tabel 3.2</b>	Data operasional proses pada HRSG.....	34
<b>Tabel 3.3</b>	Parameter Model JST.....	36
<b>Tabel 4.1</b>	Nilai MSE Preheater dengan Variasi <i>Hidden Node</i>	39
<b>Tabel 4.2</b>	Nilai MSE LP Economizer dengan variasi <i>hidden node</i> .....	41
<b>Tabel 4.3</b>	Nilai MSE LP <i>evaporator</i> dengan variasi <i>hidden node</i> .....	43
<b>Tabel 4.4</b>	Nilai MSE <i>hp economizer</i> dengan variasi <i>hidden node</i> .....	45
<b>Tabel 4.5</b>	Nilai MSE HP <i>evaporator</i> dengan variasi <i>hidden node</i> .....	47
<b>Tabel 4.6</b>	Nilai MSE <i>superheater</i> dengan variasi <i>hidden node</i> .....	49
<b>Tabel 4.7</b>	Nilai MSE dan regresi bagian HRSG keseluruhan .	51
<b>Tabel 4.8</b>	Nilai MSE validasi preheater dengan variasi <i>hidden node</i> .....	52
<b>Tabel 4.9</b>	Nilai MSE LP <i>economizer</i> dengan variasi <i>hidden node</i> .....	53
<b>Tabel 4.10</b>	Nilai MSE LP <i>evaporator</i> dengan variasi <i>hidden node</i> .....	54
<b>Tabel 4.11</b>	Nilai MSE <i>hp economizer</i> dengan variasi <i>hidden node</i> .....	55
<b>Tabel 4.12</b>	Nilai MSE HP <i>evaporator</i> dengan variasi <i>hidden node</i> .....	56
<b>Tabel 4.13</b>	Nilai MSE <i>superheater</i> dengan variasi <i>hidden node</i> .....	57
<b>Tabel 4.14</b>	Nilai MSE dan regresi bagian HRSG keseluruhan .	57
<b>Tabel 4.15</b>	Nilai efisiensi HRSG.....	59



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

PT PJB UP Gresik merupakan salah satu unit cabang PT. PJB yang bergerak di bidang pembangkitan energi listrik dengan kapasitas terbesar di antara cabang yang lain. Kapasitas yang dimiliki PT. PJB UP Gresik adalah 2.225 MW. Dengan penyumbang kapasitas daya dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap sebesar 1698,78 MW (Putra, 2016). PLTGU Gresik menggabungkan dua macam pembangkit yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Gas atau PLTG dan Pembangkit Listrik Tenaga Uap atau PLTU. Panas buang yang dihasilkan oleh PLTG masih sangat tinggi yaitu sekitar 500° C sehingga menjadi potensi energi yang dapat dimanfaatkan untuk membuat *superheated steam* melalui *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG). Ketika temperatur yang digunakan masih terlalu tinggi, maka panas akan dibuang melalui *stack* dan akan berdampak pada pemanasan lingkungan (Utama, 2013).

Pada HRSG, terdapat tiga macam *equipment* utama di dalamnya yaitu *economizer*, *evaporator*, dan *superheater*. Pada *Economizer* ini proses yang terjadi adalah pemanasan *sensible*, yaitu menaikkan temperatur air tanpa merubah fase. Pada pipa-pipa *economizer* dijaga agar tidak terjadi penguapan (mencapai titik uap air) atau dalam bahasa pembangkit dijaga agar tidak terjadi *steaming*. Selanjutnya adalah *evaporator* yang merupakan alat penukar kalor dimana akan menghasilkan uap jenuh (*saturated*) dari *feed water*. Pada vertikal HRSG dengan sirkulasi paksa yang menggunakan pompa sirkulasi, air sirkulasi akan mengalir dari drum masuk deaerator dan kembali ke drum kembali. Air *feed water* dalam fase *saturated* yang ada dalam pipa akan menuju drum dan terpisah antara yang masih berupa fase cair dan fase *saturated steam*. Dan yang terakhir adalah *superheater*, yaitu alat penukar kalor pada HRSG yang menghasilkan uap panas lanjut (*superheated steam*).

Dengan adanya bagian-bagian yang terdapat pada HRSG, diperlukan parameter dalam bagian tersebut untuk mengetahui kinerja HRSG secara keseluruhan. Maka dari itu, digunakan metode analisa berbasis Jaringan Syaraf Tiruan karena dapat mengetahui kinerja HRSG tanpa perlu dilakukan perhitungan matematis yang banyak. Yang diperlukan adalah mengetahui parameter *inlet* dan *outlet* HRSG. Untuk mengetahui efisiensi HRSG, dilakukan analisa kerja melalui pemodelan dinamika HRSG melalui metode jaringan syaraf tiruan.

Agar dapat menyusun model dinamika HRSG berupa JST, diperlukan pasangan data *input output*. Dengan data *input* yaitu panas buang dari gas turbin generator dan *mass flow rate* air yang masuk ke HRSG dan data *output* berupa temperatur dan tekanan dari *superheated steam* yang akan dialirkan ke *steam turbine*. Sehingga efisiensi HRSG dapat dihitung dari rasio antara massa *superheated steam* yang dihasilkan terhadap kalor yang digunakan. Pasangan data *input output* ini didapatkan dari *control room*. Data yang didapatkan akan digunakan untuk *training* dan validasi model JST yang didapatkan.

Dengan didaptkannya model Jaringan Syaraf Tiruan dari HRSG diharapkan dapat membantu operator dalam memonitor dinamika proses dan membantu analisa jika terjadi *fault* (Deshpande, Warke, Khandare, & Deshpande, 2012).

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan, adapun permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir ini adalah :

- a. Bagaimana menyusun model dinamika HRSG dalam bentuk Jaringan Syaraf Tiruan?
- b. Bagaimana menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan untuk mengestimasi kinerja pada HRSG?

## 1.3 Tujuan Penelitian

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

- a. Menyusunan model dinamika HRSG dalam bentuk Jaringan Syaraf Tiruan.
- b. Melakukan estimasi kinerja pada HRSG melalui pemodelan Jaringan Syaraf Tiruan.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Berdasarkan identifikasi masalah maka batasan masalah dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Data-data proses PLTGU diperoleh dari PT. PJB UP Gresik.
- b. Data spesifikasi HRSG dari parameter proses diperoleh dari data operasional yang terdapat di PT. PJB UP Gresik.
- c. Pasangan data *input ouput* pada HRSG akan dipersiapkan untuk data *training* dan data untuk validasi.
- d. Struktur JST dibangun menggunakan *toolbox neural network* dari Matlab.
- e. *Output* dan *input* dari JST diolah oleh sebuah *function* untuk mengestimasi efisiensi HRSG.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB II**

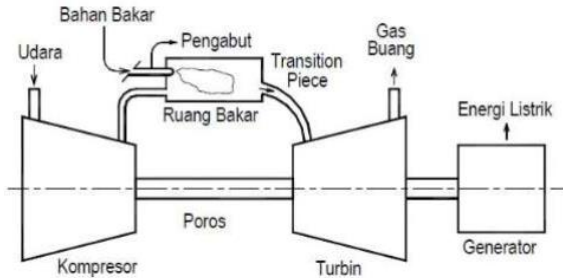
### **TEORI PENUNJANG**

#### **2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)**

Proses transfer energi pada PLTG diawali dari kompresor yang berfungsi untuk memberikan sejumlah udara yang dibutuhkan dalam proses pembakaran bahan bakar, dalam hal ini energi kimia diubah menjadi energi panas yang berbentuk gas panas pembakaran yang terjadi pada kombustor. Selanjutnya energi gas panas pembakaran yang mempunyai besaran temperatur dan kuantitas panas tersebut disalurkan ke dalam gas turbin untuk mendorong sudu-sudu turbin hingga menjadi energi kinetik untuk memutar poros turbin, dalam hal ini energi panas diubah menjadi energi mekanik. Melalui poros gas turbin yang merupakan satu kesatuan dengan rotor generator, yang berfungsi untuk membangkitkan energi listrik, selanjutnya gas bekas dari proses ekspansi gas turbin yang masih memiliki besaran temperatur dan kuantitas panas tersebut disalurkan ke dalam HRSG (PJB). Gas bekas dari proses ekspansi gas turbin tersebut yang dinamakan dengan gas buang atau *exhaust gas*. Yang mana *exhaust gas* memiliki temperatur dan kuantitas yang cukup tinggi yaitu kurang lebih 500°C. Skema proses kerja dapat dilihat di gambar 2.1.

Aliran proses pada fasa PLTG adalah :

- a. Kompresor menghisap udara bebas yang masuk melalui filter, kemudian menekannya ke dalam ruang bakar.
- b. Udara bertekanan tersebut dicampur dengan bahan bakar yang kemudian dibakar di dalam ruang bakar dan menghasilkan gas panas bertekanan tinggi yang diarahkan ke turbin oleh *nozzle*.
- c. Turbin berputar akibat pancaran gas panas yang terarah padanya sehingga daya putaran turbin mampu menggerakkan generator.
- d. Generator yang digerakkan oleh turbin gas menghasilkan energi listrik.
- e. Gas panas yang keluar dari turbin gas masuk ke HRSG guna memanaskan air dan merubah air menjadi uap.
- f. Kembali lagi ke proses a dan membentuk siklus.



**Gambar 2.1** Proses kerja unit pembangkit turbin gas (Utama, 2013)

Siklus pada turbin gas dapat diterangkan berdasarkan gambar 2.2.

- 1-2 merupakan proses kompresi isentropik dalam kompresor, kondisi 1 adalah udara atmosfer. Suhu udara hasil kompresi  $T_2$  dapat diketahui dari hubungan

$$T_2 = T_1 \cdot r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2.1)$$

Keterangan :

$r_p$  = rasio tekanan  $P_2/P_1$

$\gamma$  = perbandingan panas spesifik pada tekanan konstan dan panas spesifik pada volume konstan, untuk udara  $\gamma=1,4$

- 2-3 proses penambahan panas pada tekanan konstan dalam ruang, adapun panas yang ditambahkan pada ruang bakar adalah:

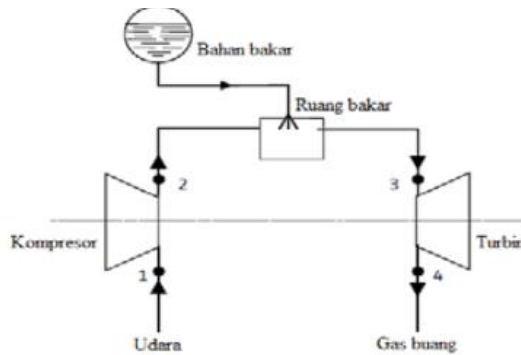
$$Q_{in} = Cp(T_3 - T_2) \quad (2.2)$$

- 3-4 proses ekspansi isentropik dalam turbin. Suhu keluar  $T_4$  dihitung dengan hubungan:

$$T_4 = T_3 \left[ \frac{1}{r_p} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2.3)$$

- 4-1 merupakan proses pelepasan kalor ke lingkungan pada tekanan konstan, adapun besarnya kalor yang dilepas dihitung dengan rumus:





**Gambar 2.2** Siklus Brayton (Satria, 2013)

$$Q_{out} = Cp (T_4 - T_1) \quad (2.4)$$

$$W_{net} = W_t - W_k = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) \quad (2.5)$$

$$P_{net} = mg \cdot W_t - mg \cdot W_k \quad (2.6)$$

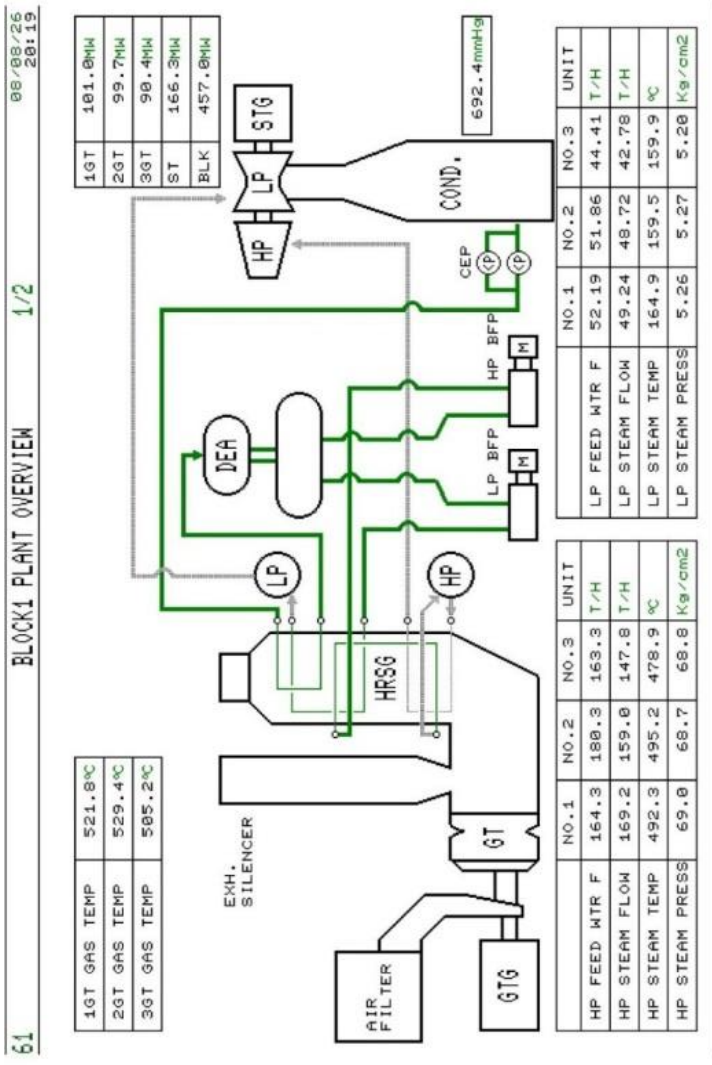
$$\eta_{siklus} = (h_3 - h_2') - (h_4' - h_1) / (h_3 - h_2') = 1 - \frac{h_4' - h_1}{h_3 - h_2'} \quad (2.7)$$

## 2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama dari pembangkit listrik jenis ini adalah generator yang seporos dengan turbin yang digerakkan oleh tenaga kinetik dari uap panas/kering. Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan berbagai macam bahan bakar terutama batu bara dan minyak bakar serta MFO untuk *start up* awal.

Untuk aliran proses dan kinerja dari PLTU adalah sebagai berikut :

- Air pada *condenser* akan dipompa oleh CEP (*Condensate Extraction Pump*) menuju ke *preheater*.
- Kemudian air yang telah melewati *preheater* akan masuk ke *deaerator*.



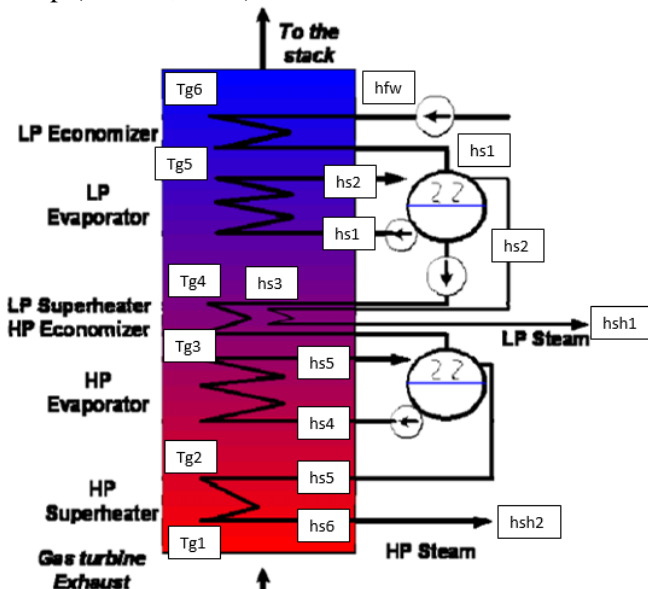
**Gambar 2.3** Diagram aliran proses PLTU (PIB)

- c. LP BFP (*Low Pressure Boiler Feed Pump*) memompa air dari *deaerator* ke LP *economizer* dan HP BFP (*High Pressure Boiler Feed Pump*) memompa air dari *deaerator* ke HP *economizer*.
- d. Air dalam *economizer* dialirkan ke LP Drum untuk kemudian dipompa oleh LP BCP (*Low Pressure Boiler Circulating Pump*) ke LP *evaporator*.
- e. Uap yang dihasilkan LP *evaporator* dialirkan kembali ke LP Drum. Air dalam HP *economizer* dialirkan ke HP Drum untuk kemudian dipompa oleh HP BCP (*High Pressure Boiler Circulation Pump*) ke HP *evaporator*.
- f. Selanjutnya uap yang dihasilkan HP *evaporator* dialirkan ke HP Drum.
- g. Air dalam HP *economizer* dialirkan ke HP Drum untuk kemudian dipompa oleh HP BCP (*High Pressure Boiler Circulation Pump*) ke HP *evaporator* uap yang dihasilkan HP *evaporator* dialirkan ke HP Drum.
- h. Uap dari LP Drum dialirkan ke LP *Steam Turbin* guna menggerakkan turbin LP.
- i. Uap dari HP Drum dialirkan ke *superheater* untuk mendapatkan uap kering, kemudian uap tersebut dialirkan ke HP *Steam Turbin* guna menggerakkan turbin HP.
- j. Uap dari turbin HP dialirkan ke turbin LP guna menggerakkan turbin LP.
- k. Generator yang digerakkan oleh turbin uap (HP dan LP) menghasilkan energi listrik.
- l. Uap yang telah menggerakkan *Steam Turbine* akan kembali ke *Condenser*. Dalam kondensor uap dari turbin mengalami pengembunan air.
- m. Kembali lagi ke proses g dan membentuk siklus.

### 2.3 *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)*

*Heat Recovery steam Generator* atau HRSG adalah sebuah alat yang dapat mengambil panas dari aliran gas dengan temperatur tinggi. Alat ini memproduksi uap yang dapat digunakan kembali dalam sebuah proses atau untuk menggerakkan turbin uap.

Biasanya HRSG dipasang dalam pembangkit listrik dengan sistem *combine cycle*. Pada sistem ini, udara panas hasil dari turbin gas dialirkan ke HRSG untuk menghasilkan uap yang akan memutar turbin uap (Firdaus, 2010).



Gambar 2.4 Bagian HRSG di PLTGU (Nordin & Majid, 2015)

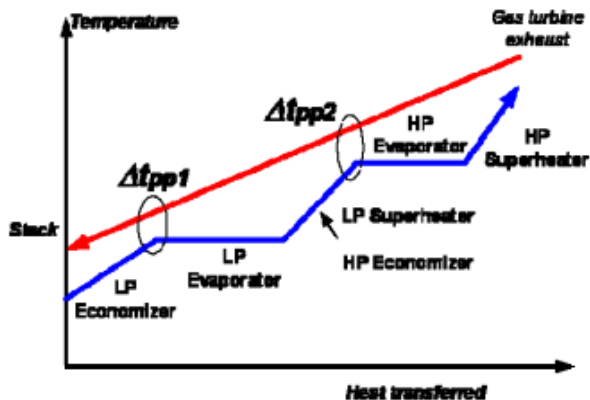
Seperti yang terlihat pada gambar 2.4, terdapat beberapa bagian utama HRSG, yaitu *preheater*, *economiser*, *evaporator*, dan *superheater*.

Kalor yang dihasilkan gas turbine selanjutnya dimanfaatkan untuk memanaskan air menjadi uap, lalu menaikkan temperature uap sampai mencapai titik jenuh (*saturated steam*).

$$Q_{lepas} = Q_{terima} \quad (2.1)$$

Q lepas merupakan kalor yang dihasilkan gas turbine, dan q terima merupakan kalor yang digunakan untuk memanaskan air menjadi uap. Maka persamaan (2.1) menjadi

$$m_{eg} \cdot c_{eg} \cdot (T_{gin} - T_{gout}) = m_{st} \cdot (h_{sh} - h_{fw}) \quad (2.2)$$



**Gambar 2.5** Kesetimbangan energi pada HRSG (Nordin & Majid, 2015)

Keterangan:

$m_{eg}$  : massa gas buang (kg)

$c_{eg}$  : koefisien termal gas buang (kJ/kg.K)

$T_{gin}$  : temperatur gas buang masuk (K)

$T_{gout}$  : temperatur gas buang keluar (K)

$m_{st}$  : massa *steam* yang dihasilkan (kg)

$h_{sh}$  : entalpi *steam* yang dihasilkan (kJ/kg)

$h_{fw}$  : entalpi *feed water* (kJ/kg)

### 2.3.1 Preheater

*Preheater* merupakan pemanas awal air yang dipompakan dari kondensator sebelum deaerator. Pada HRSG, *preheater* bertujuan menaikkan suhu sebelum masuk deaerator yang nantinya akan diteruskan ke *economizer*. *Preheater* terletak di bagian paling atas dari HRSG.

### 2.3.2 Economizer

*Economizer* adalah alat yang digunakan untuk memanaskan air pengisi ketel dengan media pemanas energi kalor yang

terkandung didalam gas buang. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan air pengisi ketel yang suhunya tidak jauh berbeda dengan air yang terdapat pada *boiler drum*, serta untuk menaikkan efisiensi *boiler*.

Untuk kesetimbangan energi pada *economizer*, digunakan persamaan (2.2) di atas, menjadi

$$m_{gt} \cdot c_{pg} \cdot (T_{g5} - T_{g6}) = m_{st} \cdot (h_{s1} - h_{fw}) \quad (2.3)$$

Persamaan (2.3) merupakan persamaan untuk LP *Economizer*, sedangkan persamaan untuk HP *Economizer* adalah

$$m_{gt} \cdot c_{pg} \cdot (T_{g3} - T_{g4}) = m_{st} \cdot (h_{s4} - h_{s3}) \quad (2.4)$$

Keterangan :

$m_{gt}$ : massa gas buang (kg)

$c_{pg}$ : koefisien termal gas buang (kJ/kg.K)

$T_{g3}$ : temperatur *exhaust gas* masuk HP *Economizer* (K)

$T_{g4}$ : temperatur *exhaust gas* keluar HP *Economizer* (K)

$T_{g5}$ : temperatur *exhaust gas* masuk LP *Economizer* (K)

$T_{g6}$ : temperatur *exhaust gas* keluar LP *Economizer* (K)

$m_{st}$ : massa *steam* yang dihasilkan (kg)

$h_{fw}$ : entalpi *feed water* yang masuk LP *Economizer* (kJ/kg)

$h_{s1}$ : entalpi air yang dihasilkan LP *Economizer* (kJ/kg)

$h_{s3}$ : entalpi air yang masuk HP *Economizer* (kJ/kg)

$h_{s4}$ : entalpi air yang dihasilkan HP *Economizer* (kJ/kg)

### 2.3.3 *Evaporator*

*Evaporator* merupakan elemen HRSG yang berfungsi untuk mengubah air hingga menjadi uap jenuh, pipa-pipa *evaporator* pada ketel uap biasanya terletak pada lantai (*water floor*) dan juga pada dinding (*water wall*). Pada pipa ini uap jenuh pada kualitas 0,80 – 0,98, sehingga sebagian masih berbentuk fase cair. *Evaporator* akan memanaskan uap air yang turun dari drum uap (*steam drum*) yang masih dalam fase cair agar berbentuk uap jenuh sehingga bisa diteruskan menuju *superheater*. Uap bercampur air

mengalir pada pipa-pipa *evaporator* menuju drum uap. Pada drum uap terjadi pemisahan antara uap dengan air, yang disebabkan perbedaan massa jenis.

Untuk kesetimbangan energi pada *evaporator*, digunakan persamaan (2.2) di atas, menjadi

$$m_{gt} \cdot c_{pg} \cdot (T_{g4} - T_{g5}) = m_{st} \cdot (h_{s2} - h_{s1}) \quad (2.5)$$

Persamaan (2.5) merupakan persamaan untuk LP *economizer*, sedangkan persamaan untuk HP *economizer* adalah

$$m_{gt} \cdot c_{pg} \cdot (T_{g2} - T_{g3}) = m_{st} \cdot (h_{s5} - h_{s4}) \quad (2.6)$$

Keterangan :

$m_{gt}$ : massa *exhaust gas* (kg)

$c_{pg}$ : koefisien termal gas buang (kJ/kg.K)

$T_{g2}$ : temperatur *exhaust gas* masuk HP *Evaporator* (K)

$T_{g3}$ : temperatur *exhaust gas* keluar HP *Evaporator* (K)

$T_{g4}$ : temperatur *exhaust gas* masuk LP *Evaporator* (K)

$T_{g5}$ : temperatur *exhaust gas* keluar LP *Evaporator* (K)

$m_{st}$ : massa *steam* yang dihasilkan (kg)

$h_{s1}$ : entalpi air yang masuk LP *Evaporator* (kJ/kg)

$h_{s2}$ : entalpi uap yang dihasilkan LP *Evaporator* (kJ/kg)

$h_{s4}$ : entalpi air yang masuk HP *Evaporator* (kJ/kg)

$h_{s5}$ : entalpi uap yang dihasilkan HP *Evaporator* (kJ/kg)

### 2.3.4 Drum Uap / Steam Drum

*Steam drum* adalah alat yang digunakan untuk memisahkan bagian air, uap basah dan uap kering karena di dalam *boiler* terjadi pemanasan bertingkat. Setiap unit *boiler* dilengkapi oleh sebuah *steam drum* dan dipasang pada bagian atas dari *boiler*.

### 2.3.5 Superheater

Uap yang dihasilkan *boiler drum* ada yang masih berupa uap basah, dan untuk mendapatkan uap yang betul-betul kering uap basah yang berasal dari *boiler drum* perlu dipanaskan lagi pada

*superheater* sehingga uap kering yang dihasilkan naik ke *steam drum* dan memutar sudu – sudu turbin uap. Setiap *boiler* biasanya dilengkapi dengan dua buah *superheater* yaitu *primary* dan *secondary super heater* yang dipasang pada bagian atas dari ruang pembakaran (*furnace*).

Untuk kesetimbangan energi pada *superheater*, digunakan persamaan (2.2) di atas, menjadi

$$m_{gt} \cdot c_{pg} \cdot (T_{g3} - T_{g4}) = m_{st} \cdot (h_{sh1} - h_{s2}) \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) merupakan persamaan untuk LP *superheater*, sedangkan persamaan untuk HP *superheater* adalah

$$m_{gt} \cdot c_{pg} \cdot (T_{g1} - T_{g2}) = m_{st} \cdot (h_{sh2} - h_{s5}) \quad (2.8)$$

Keterangan :

$m_{gt}$ : massa *exhaust gas* (kg)

$c_{pg}$ : koefisien termal gas buang (kJ/kg.K)

$T_{g1}$ : temperatur *exhaust gas* masuk HP *superheater* (K)

$T_{g2}$ : temperatur *exhaust gas* keluar HP *superheater* (K)

$T_{g3}$ : temperatur *exhaust gas* masuk LP *superheater* (K)

$T_{g4}$ : temperatur *exhaust gas* keluar LP *superheater* (K)

$m_{st}$ : massa *steam* yang dihasilkan (kg)

$h_{s2}$ : entalpi uap yang masuk LP *superheater* (kJ/kg)

$h_{sh1}$ : entalpi uap yang dihasilkan LP *superheater* (kJ/kg)

$h_{s5}$ : entalpi uap yang masuk HP *superheater* (kJ/kg)

$h_{sh2}$ : entalpi uap yang dihasilkan HP *superheater* (kJ/kg)

### 2.3.6 Boiler Feed Pump ( BFP )

Boiler Feed Pump merupakan pompa pengisi air boiler. Pompa tersebut memompakan deaerator *storage tank* ke *boiler*.

Berdasarkan bagian-bagian yang terdapat pada HRSG dan penurunannya, dapat diketahui efisiensi HRSG. Besarnya efisiensi termal HRSG merupakan perbandingan laju energi yang dibutuhkan dalam perubahan air menjadi uap panas lanjut



(*superheated steam*) dengan laju aliran energi gas buang di dalam HRSG (Styoko, 2006).

$$\eta = \frac{Q_h}{Q_{Eg}} \times 100\% \quad (2.9)$$

## 2.4 Jaringan Syaraf Tiruan

Jaringan Syaraf Tiruan (JST) atau *Artificial Neural Network* (ANN) merupakan suatu sistem pemrosesan informasi yang memiliki karakteristik performansi yang mirip dengan jaringan syaraf biologis. JST telah dikembangkan sebagai generalisasi dari model matematik untuk kesadaran manusia atau syaraf biologis, dengan asumsi dasar sebagai berikut:

- a. Informasi yang diproses muncul sebagai beberapa elemen sederhana yang disebut neuron atau node.
- b. Sinyal dilewatkan diantara neuron menggunakan link koneksi atau koneksi yang terhubung.
- c. Setiap link koneksi membunyai bobot tertentu, dimana pada jaringan syaraf secara umum, bobot tersebut akan melipatgandakan sinyal yang ditransmisikan antara neuron yang satu dengan yang lainnya.
- d. Setiap neuron mengaplikasikan fungsi aktivasi (biasanya non linear) menuju masukan jaringan (gabungan bobot dari sinyal masukan) untuk menentukan sinyal keluaran dari neuron.

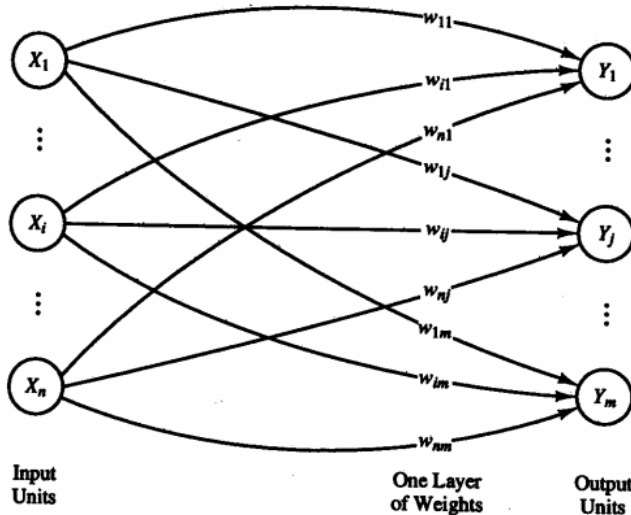
JST dikarakterisasi oleh berbagai hal yaitu, pola dari koneksi antara neuron (*node*) atau disebut juga dengan arsitektur jaringan, metode untuk menentukan bobot pada koneksi yang disebut juga algoritma pelatihan atau pembelajaran, dan fungsi aktivasi. Hal-hal tersebut akan memiliki pola atau nilai yang berbeda pada tiap kasus dalam menggunakan jaringan syaraf tiruan.

### 2.4.1 Arsitektur Jaringan Syaraf Tiruan

Arsitektur JST menggambarkan bagaimana susunan dari neuron (*node*) dan pola dari hubungan antara neuron tersebut. Beberapa arsitektur yang sering digunakan yaitu *single-layer* dan *multi-layer*.

- *Single-Layer*

Arsitektur *single-layer* hanya mempunyai satu lapisan bobot saja. Sehingga, setiap masukan akan dihubungkan langsung dengan keluaran.



**Gambar 2.6** Arsitektur *Single-Layer* (Fausett, 1994)

Dari gambar 2.6 diatas, dapat dilihat bahwa seluruh unit masukan terhubung ke setiap unit keluaran dengan bobot yang berbeda-beda. Tiap unit masukan tidak terhubung ke unit masukan lain dan unit keluaran juga tidak terhubung ke unit keluaran yang lain.

Node masukan (*input node*) disimbolkan sebagai  $X_i$  node keluaran (*hidden node*) disimbolkan sebagai  $Y_j$ , dimana nilai  $i$  dan  $j$  sesuai dengan jumlah node yang digunakan. Persamaan untuk memperoleh besar sinyal masukan ke node keluaran adalah sebagai berikut,

$$y_{in.j} = \sum_{i=1}^n x_i w_{ij} \quad (2.10)$$

dengan:

$y_{in.j}$  = sinyal masukan ke node tersembunyi ( $j=1,2,3,\dots,n$ )

$x_i$  = sinyal keluaran dari node masukan ( $i=1,2,3,\dots,m$ )

$w_{ij}$  = nilai bobot dari node masukan menuju node tersembunyi.

Kemudian, sinyal keluaran dari node keluaran dapat diperoleh dengan mengaplikasikan sinyal masukannya pada fungsi aktivasi. Persamaan berikut dapat digunakan untuk mencari sinyal keluaran node tersembunyi,

$$y_j = f(y_{in.j}) \quad (2.11)$$

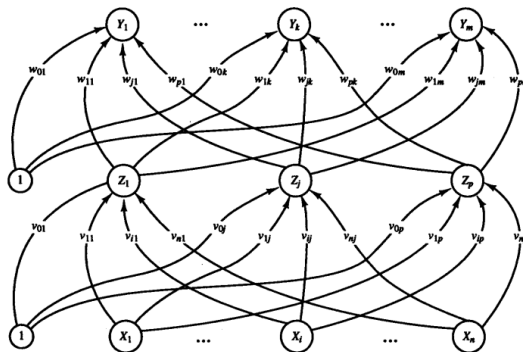
dengan:

$y_j$  = sinyal keluaran dari node tersembunyi ( $j=1,2,3,\dots,n$ )

- **Multi-Layer**

Jaringan *multi-layer* merupakan perluasan dari *single-layer*. Dalam jaringan ini, selain unit input dan output, ada unit-unit lain (sering disebut lapisan tersembunyi). Dimungkinkan pula adabeberapa lapisan tersembunyi. Sama seperti pada unit masukan dan keluaran, unit-unit dalam satu lapisan tidak saling berhubungan.

Sebagai contoh, gambar 2.7 merupakan contoh Jaringan Syaraf Tiruan dengan menggunakan pola atau arsitektur *Multilayer Network* dengan satu lapisan masukan (*input layer*), satu lapisan tersembunyi (*hidden layer*), dan satu lapisan keluaran (*output layer*).



**Gambar 2.7** Arsitektur *Multi-Layer* (Fausett, 1994)

Node masukan (*input node*) disimbolkan sebagai  $X_i$ , node tersembunyi (*hidden node*) disimbolkan sebagai  $Y_j$ , dan node keluaran (*output node*) disimbolkan sebagai  $Z_k$ , dimana nilai  $i, j$ , dan  $k$  sesuai dengan jumlah node yang digunakan. Persamaan untuk memperoleh besar sinyal masukan ke node tersembunyi adalah sebagai berikut,

$$y_{in.j} = v_{0j} + \sum_{i=1}^n x_i v_{ij} \quad (2.12)$$

dengan:

$y_{in.j}$  = sinyal masukan ke node tersembunyi ( $j=1,2,3,\dots,n$ )

$v_{0j}$  = nilai bobot dari bias menuju node tersembunyi

$x_i$  = sinyal keluaran dari node masukan ( $i=1,2,3,\dots,m$ )

$v_{ij}$  = nilai bobot dari node masukan menuju node tersembunyi.

Persamaan untuk memperoleh besar sinyal masukan ke node keluaran adalah sebagai berikut,

$$z_{in.k} = w_{0k} + \sum_{j=1}^n y_j w_{jk} \quad (2.13)$$

dengan:

$z_{in.k}$  =sinyal masukan ke node keluaran ( $k=1,2,3,\dots,p$ )

$w_{0k}$  =nilai bobot dari bias menuju node keluaran

$y_j$  =sinyal keluaran dari node tersembunyi ( $j=1,2,3,\dots,n$ )

$w_{jk}$  =nilai bobot dari node tersembunyi menuju node keluaran.

Kemudian,sinyal keluaran dari node tersembunyi dan node keluaran dapat diperoleh dengan mengaplikasikan sinyal masukan pada fungsi aktivasi. Salah satu fungsi aktivasi yang dapat digunakan yaitu bipolar sigmoid atau disebut juga tangen hiperbolik. Persamaan berikut dapat digunakan untuk mencari sinyal keluaran node tersembunyi,

$$y_j = \tanh(y_{in.j}) \quad (2.14)$$

dengan:

$y_j$  = sinyal keluaran dari node tersembunyi ( $j=1,2,3,\dots,n$ ).

Persamaan mencari sinyal keluaran dari node keluaran adalah sebagai berikut,

$$z_k = \tanh(z_{in.k}) \quad (2.15)$$

dengan:

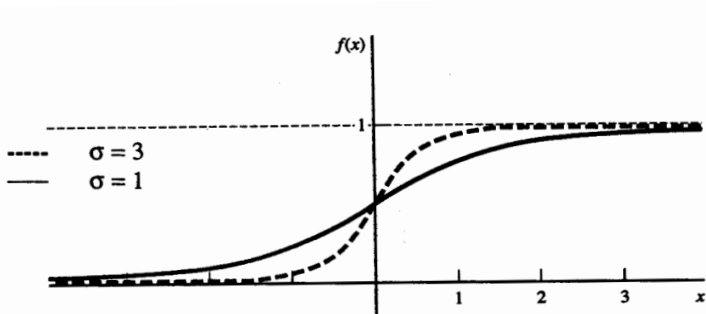
$z_k$  = sinyal keluaran dari node keluaran ( $k=1,2,3,\dots,p$ ).

### 2.4.2 Fungsi Aktivasi

Fungsi aktivasi digunakan untuk menghasilkan nilai keluaran dari setiap node yang dilewati. Terdapat beberapa jenis fungsi aktivasi yang paling sering digunakan pada jaringan syaraf tiruan yaitu sigmoid logaritmik (*logsig*), sigmoid tangen (*tansig*), dan linear (*purelin*). Fungsi aktivasi sigmoid logaritmik dan sigmoid tangen dapat meminimalisir kapasitas komputasi untuk pelatihan, sedangkan fungsi aktivasi linear lebih banyak digunakan pada *output node*.

- **Sigmoid Logaritmik**

Fungsi sigmoid logaritmik merupakan fungsi aktivasi dengan range keluaran dari 0 hingga 1. Fungsi ini biasa disebut sebagai *binary sigmoid*. Persamaan fungsi ini dan turunannya adalah sebagai berikut



**Gambar 2.8** Fungsi Sigmoid Logaritmik (Fausett, 1994)

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-\sigma x}} \quad (2.16)$$

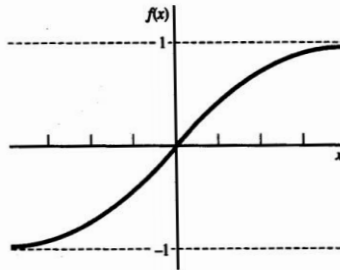
$$f'(x) = \sigma f(x)[1 - f(x)] \quad (2.17)$$

- **Sigmoid Tangen**

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

$$f(x) = \frac{2}{1+e^{-\sigma x}} - 1 \quad (2.18)$$

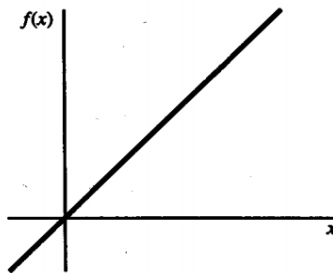
$$f'(x) = \frac{\sigma}{2} [1 + f(x)][1 - f(x)] \quad (2.19)$$



**Gambar 2.9** Fungsi Sigmoid Tangen

- **Linear**

Fungsi linear merupakan fungsi aktivasi dengan keluaran sama seperti masukannya. Fungsi ini biasa disebut sebagai fungsi identitas. Persamaan fungsi ini dan turunannya adalah sebagai berikut



**Gambar 2.10** Fungsi Linear (Fausett, 1994)

$$f(x) = x \quad (2.20)$$

$$f'(x) = 1 \quad (2.21)$$

### 2.4.3 Algoritma Pelatihan Jaringan Syaraf Tiruan

- **Algoritma *Steepest Descent***

Algoritma *steepest descent* merupakan algoritma turunan pertama. Algoritma ini menggunakan turunan pertama dari fungsi *error* total untuk meminimalkan *error*. Gradien  $g$  didefinisikan sebagai turunan orde pertama dari fungsi *error* total

$$g = \frac{\partial E(x,w)}{\partial w} = \left[ \frac{\partial E}{\partial w_1} \frac{\partial E}{\partial w_2} \frac{\partial E}{\partial w_3} \dots \frac{\partial E}{\partial w_N} \right]^T \quad (2.22)$$

Untuk perubahan bobotnya dapat dihitung dengan persamaan

$$w_{k+1} = w_k + \alpha g_k \quad (2.23)$$

dengan  $\alpha$  adalah konstanta pembelajaran.

Proses pelatihan dari algoritma ini bersifat asimtotik konvergen. Saat mendekati nilai yang diinginkan, semua elemen akan menjadi sangat kecil dan akan mengakibatkan perubahan bobot yang sangat kecil sekali.

- **Metode Newton**

Metode Newton menggunakan turunan orde 2 dari fungsi *error* total yang diwakilkan dengan matriks Hessian  $H$ .

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E}{\partial w_1^2} & \frac{\partial^2 E}{\partial w_1 \partial w_2} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_1 \partial w_N} \\ \frac{\partial^2 E}{\partial w_2 \partial w_1} & \frac{\partial^2 E}{\partial w_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_2 \partial w_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 E}{\partial w_N \partial w_1} & \frac{\partial^2 E}{\partial w_N \partial w_2} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_N^2} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Untuk perubahan bobotnya dapat dihitung dengan persamaan

$$w_{k+1} = w_k - H_k^{-1} g_k \quad (2.25)$$

Sebagai turunan orde 2, matriks Hessian memberikan evaluasi yang tepat pada perubahan vektor gradien. Dengan membandingkan persamaan (2.22) dan (2.24), dapat diketahui bahwa ukuran step yang cocok diberikan dengan invers dari matriks Hessian.

- **Metode Gauss-Newton**

Jika metode Newton digunakan untuk memperbarui bobot, untuk mendapat nilai matriks Hessian  $H$ , maka turunan orde dua dari fungsi *error* total haruslah dihitung dan dapat memperlama waktu yang digunakan. Untuk mempermudah, maka dikenalkan matriks Jacobian

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_2} \dots & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_N} \\ \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_2} \dots & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_N} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial e_{1,M}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{1,M}}{\partial w_2} \dots & \frac{\partial e_{1,M}}{\partial w_N} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial e_{P,1}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{P,1}}{\partial w_2} \dots & \frac{\partial e_{P,1}}{\partial w_N} \\ \frac{\partial e_{P,2}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{P,2}}{\partial w_2} \dots & \frac{\partial e_{P,2}}{\partial w_N} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial e_{P,M}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{P,M}}{\partial w_2} \dots & \frac{\partial e_{P,M}}{\partial w_N} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Dikenalkan juga vektor *error* dengan bentuk

$$e = \begin{bmatrix} e_{1,1} \\ e_{1,2} \\ \dots \\ e_{1,M} \\ \dots \\ e_{P,1} \\ e_{P,1} \\ \dots \\ e_{P,M} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Untuk perubahan bobotnya dapat dihitung dengan persamaan



$$w_{k+1} = w_k - (J_k^T J_k)^{-1} J_k e_k \quad (2.28)$$

Kelebihan algoritma ini dibandingkan metode Newton adalah tidak perlu menghitung turunan kedua dari fungsi *error* total

- **Algoritma Levenberg-Marquardt**

Algoritma *Levenberg-Marquardt* (LM) merupakan pengembangan dari algoritma *Back Propagation* (BP). Algoritma ini merupakan gabungan antara algoritma *steepest descent* dan algoritma Gauss-Newton. Algoritma LM menggabungkan kecepatan dari algoritma Gauss-Newton dan stabilitas dari algoritma EBP.

Adapun tahapan dari pelatihan algoritma LM dapat dilihat pada gambar 2 di bawah ini

Adapun dari gambar 2.9, dapat dijelaskan tahapan pelatihan algoritma LM sebagai berikut:

1. Dengan memberikan bobot awal (acak), dihitung nilai SSE melalui persamaan

$$E(x, w) = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^p \sum_{m=1}^m e_{p,m}^2 \quad (2.29)$$

dengan :

x = vektor input

w = vektor bobot

p = indeks pola

m = indeks output

$e_{p,m}$  = *error* pelatihan pada *output* m saat diberikan pola p yang didefinisikan sebagai

$$e_{p,m} = d_{p,m} - o_{p,m} \quad (2.30)$$

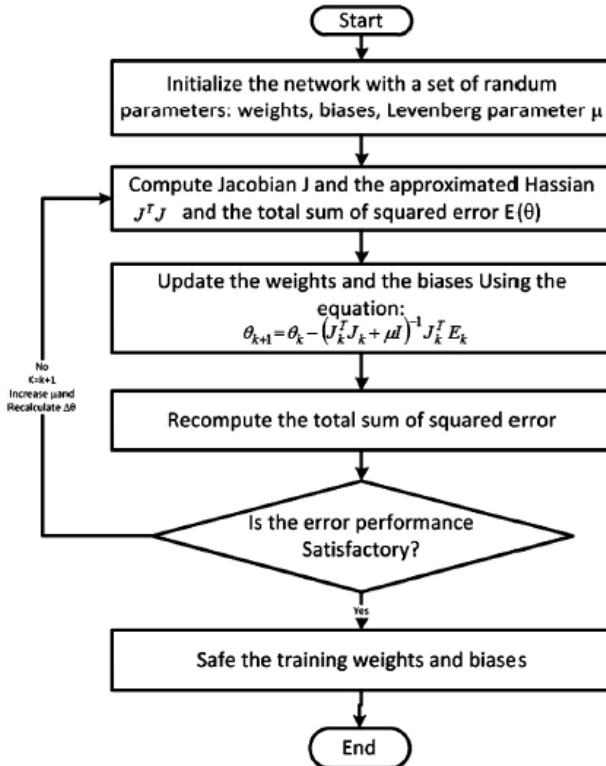
dengan :

d = output yang diinginkan

o = output yang dihasilkan

2. Menghitung elemen matriks Jacobian
3. Memperbarui bobot dan menghitung kembali SSE.
4. Jika nilai SSE yang diperbarui lebih besar, maka nilai  $w_k$  tidak diubah dan koefisien kombinasi dinaikkan dengan faktor 10

atau faktor lainnya. Kemudian kembali ke langkah 2 dan perbarui bobot lagi.



**Gambar 2.11** Blok diagram pelatihan menggunakan algoritma LM untuk 5 output (Fausett, 1994)

5. Jika nilai SSE yang diperbarui lebih kecil, maka nilai  $w_k$  diperbarui dan koefisien kombinasi diturunkan dengan faktor 10 atau faktor yang sesuai dengan faktor langkah 4.
6. Kembali ke langkah 2 dengan bobot baru sampai nilai SSE lebih kecil dari yang diinginkan.

## 2.5 Root Mean Square Error (RMSE)

Model JST yang dirancang harus dievaluasi performansinya. Metode pengukuran evaluasi performansi model JST dapat menggunakan metode RMSE. Metode RMSE mengukur dengan membandingkan perbedaan nilai estimasi dengan nilai aktual. Dari RMSE, dapat diketahui kualitas model JST apakah layak atau tidak. Semakin kecil nilai RMSE semakin baik karena *error* yang dihasilkan hanya sedikit. Model yang bagus memiliki nilai RMSE mendekati nol. Persamaan RMSE dapat dilihat pada persamaan di bawah (Papantoniou & Kolokotsa, 2015).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2.31)$$

dengan:

$y_i$  = data aktual  
 $\hat{y}_i$  = data hasil prediksi  
 $n$  = jumlah data

Untuk membandingkan nilai RMSE pada data yang berbeda ukuran, maka dapat dilakukan dengan menormalisasi RMSE yang dikenal sebagai *normalized* RMSE (nRMSE). Persamaan untuk menghitung nilai nRMSE yaitu

$$RMSE = \frac{RMSE}{y_{max} - y_{min}} \quad (2.32)$$

dengan:

$y_{max}$  = data maksimum aktual  
 $y_{min}$  = data minimum aktual

Sebelum digunakan pada proses pelatihan jaringan syaraf tiruan, data pada setiap variabel dinormalisasi pada rentang 0,1–0,9 dengan perhitungan sebagai berikut.

$$x' = \frac{0,8(x-b)}{(a-b)} + 0,1 \quad (2.33)$$

Keterangan :

$x'$  = data hasil normalisasi  
 $x$  = data asli

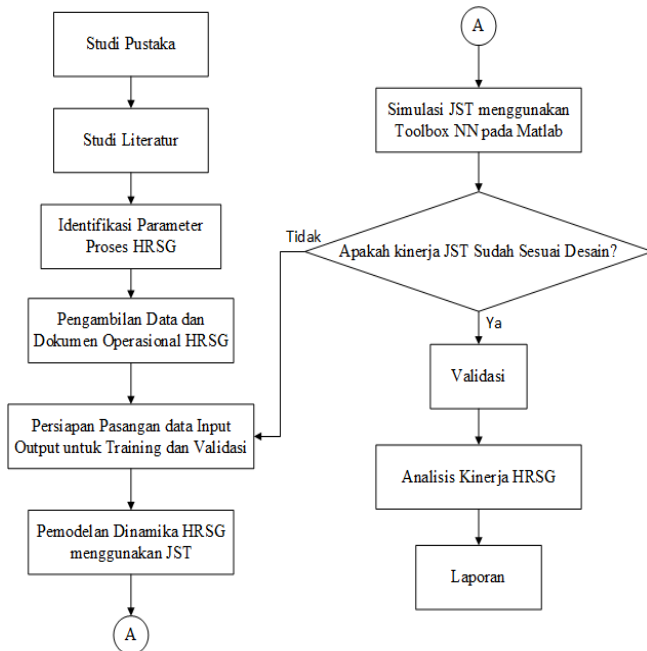
a = nilai maksimum data asli

b = nilai minimum data asli

Setelah dilakukan pelatihan jaringan, data prediksi hasil keluaran jaringan kemudian dikembalikan pada nilainya semula, dengan cara denormaliasi .

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

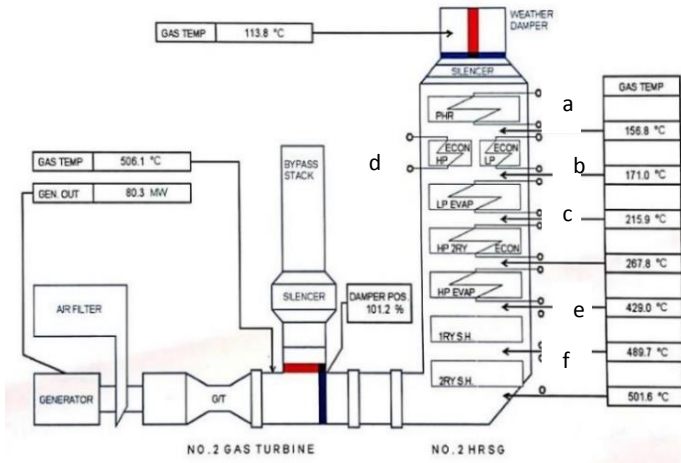
Untuk mencapai tujuan penelitian, maka metodologi yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini sesuai dengan diagram alir penelitian pada Gambar 3.1 yang mendeskripsikan tahap-tahap penelitian sebagai berikut :



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

### 3.1 Identifikasi Parameter Proses HRSG

Untuk mengetahui parameter-parameter yang mempengaruhi HRSG, diperlukan pemahaman mengenai alur produksi HRSG itu sendiri yang terdapat pada bab 2. Parameter HRSG sendiri terdapat pada gambar 3.2.

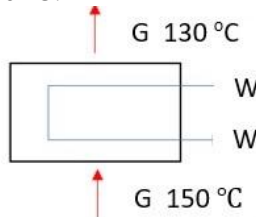


**Gambar 3.2** Parameter HRSG (PJB).

**a. Preheater**

*Preheater* memiliki *input* berupa *feed water* dari kondenser yang dipompa oleh CEP dan *exhaust gas*. Terjadi pemanasan air di *preheater* oleh *exhaust gas* yang menyebabkan temperatur *feed water* ( $T_{iw}$ ) meningkat. *Output preheater* yaitu air dengan temperatur lebih tinggi dan juga *exhaust gas* hasil pembakaran. Lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.3.

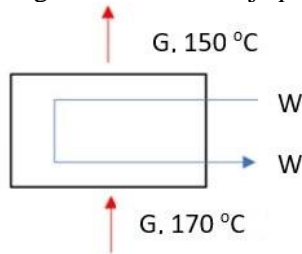
Gambar 3.3 menjelaskan *input* dari *preheater* ada dua yaitu gas (G) dengan garis merah dan air (W) dengan garis biru. Gas dengan temperatur 150 °C memasuki *preheater* dan memanaskan air yang masuk. Gas sisa pemanasan dialirkan lagi keluar *preheater* dengan temperatur 130 °C.



**Gambar 3.3** Mass flow rate preheater

**b. Low pressure (LP) economizer**

Pada LP *Economiser*, terjadi pemanasan air yang dipompa dari deaerator kemudian diteruskan ke LP *evaporator*. Terdapat penambahan temperatur pada air yang melewati LP *economizer*. Sama seperti *preheater*, LP *economizer* memiliki *input* berupa air dan *exhaust gas* dan *output* berupa air hasil pembakaran dan gas sisa pembakaran yang diteruskan menuju *preheater*.



**Gambar 3.4** Mass flow rate lp economizer

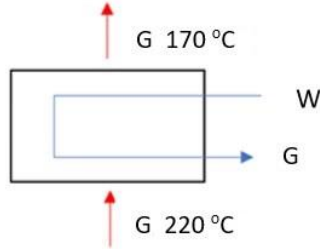
Gambar 3.4 menjelaskan *input* dari LP *economizer* ada dua yaitu gas (G) dengan garis merah dan air (W) dengan garis biru. Gas dengan temperatur 170 °C memasuki lp *economizer* dan memanaskan air yang masuk. Gas sisa pemanasan dialirkan lagi keluar lp *economizer* dengan temperatur 150 °C.

**c. LP evaporator**

LP *evaporator* merupakan *equipment* lanjutan setelah LP *economiser*. Terjadi pemanasan air lanjutan yang menyebabkan air berubah fasa menjadi *steam*/uap bertekanan. *Input* pada LP *evaporator* adalah *exhaust gas* dan air yang dialirkan dari LP drum lalu dikembalikan lagi ke LP drum (ketika sudah terjadi perubahan fasa menjadi uap) yang nantinya akan dialirkan menuju LP turbin. *Output* pada LP *evaporator* yaitu *steam*/uap bertekanan dan *exhaust gas*.

Pada gambar 3.5 menjelaskan *input* dari LP *evaporator* ada dua yaitu gas (G) dengan garis merah dan air (W) dengan garis biru. Gas dengan temperatur 220 °C memasuki lp *evaporator* dan memanaskan air yang masuk. Gas sisa pemanasan dialirkan lagi

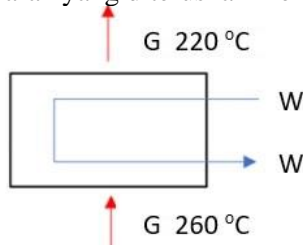
keluar LP *evaporator* dengan temperatur 170 °C. Air yang dipanaskan oleh LP *evaporator* berubah fasa menjadi uap bertekanan (G) yang akan diteruskan ke lp drum.



**Gambar 3.5** Mass flow rate lp evaporator

**d. High pressure (HP) economizer**

Pada HP *economizer*, terjadi pemanasan air yang dipompa oleh HP BFP dari deaerator kemudian diteruskan ke HP *evaporator*. Terdapat perubahan temperatur pada air yang melewati HP *economizer*. Sama seperti *preheater*, HP *economizer* memiliki *input* berupa air dan *exhaust gas* dan *output* berupa air dan gas sisa pembakaran yang diteruskan menuju *preheater*.



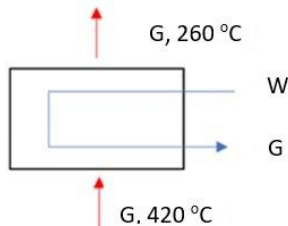
**Gambar 3.6** Mass flow rate hp economizer

Gambar 3.6 menjelaskan input dari HP *economizer* ada dua yaitu gas (G) dengan garis merah dan air (W) dengan garis biru. Gas dengan temperatur 260 °C memasuki HP *economizer* dan memanaskan air yang masuk. Gas sisa pemanasan dialirkan lagi keluar HP *economizer* dengan temperatur 220 °C.



**e. HP evaporator**

HP *evaporator* merupakan *equipment* lanjutan setelah HP *economiser*. Terjadi pemanasan air lanjutan yang menyebabkan air berubah fasa menjadi *steam*/uap bertekanan. *Input* pada HP *evaporator* adalah *exhaust gas* dan air yang dialirkan dari HP drum lalu dikembalikan lagi ke HP drum (ketika sudah terjadi perubahan fasa menjadi uap) yang nantinya akan dialirkan menuju HP turbin. *Output* pada HP *evaporator* yaitu *steam*/uap bertekanan dan *exhaust gas*.



**Gambar 3.7** Mass flow rate hp evaporator

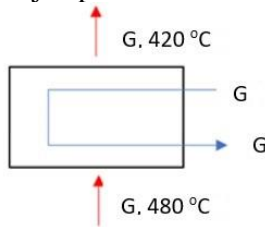
Gambar 3.7 menjelaskan *input* dari HP *evaporator* ada dua yaitu gas (G) dengan garis merah dan air (W) dengan garis biru. Gas dengan temperatur 420 °C memasuki HP *evaporator* dan memanaskan air yang masuk. Gas sisa pemanasan dialirkan lagi keluar HP *evaporator* dengan temperatur 260 °C. Air yang dipanaskan oleh HP *evaporator* berubah fasa menjadi uap bertekanan (G) yang akan diteruskan ke HP drum.

**f. Superheater**

*Superheater* merupakan *equipment* paling akhir dari aliran *high pressure* sebelum *steam* dialirkan menuju turbin. *Superheater* berfungsi memanaskan *steam* menjadi uap kering yang bertekanan sehingga dapat memutar HP turbin. *Input superheater* adalah *exhaust gas* dari gas turbin generator dan *steam* dari HP drum yang nantinya dialirkan langsung ke HP turbin.

Pada gambar 3.8 menjelaskan input dari hp evaporator ada dua yaitu *exhaust gas* (G) dengan garis merah dan uap dari hp evaporator (G) dengan garis biru. *Exhaust gas* dengan temperatur 480 °C memasuki superheater dan membakar uap yang masuk.

*Exhaust gas* sisa pemanasan dialirkan lagi keluar *superheater* dengan temperatur 420 °C. Uap kering (G) yang dihasilkan oleh *superheater* keluar menuju hp turbin untuk memutar turbin.



**Gambar 3.8** Mass flow rate superheater

Dari analisis proses tiap bagian dari HRSG, dapat disimpulkan tiap parameter yang dibutuhkan melalui sebuah tabel. Parameter proses dapat dilihat pada tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Parameter HRSG

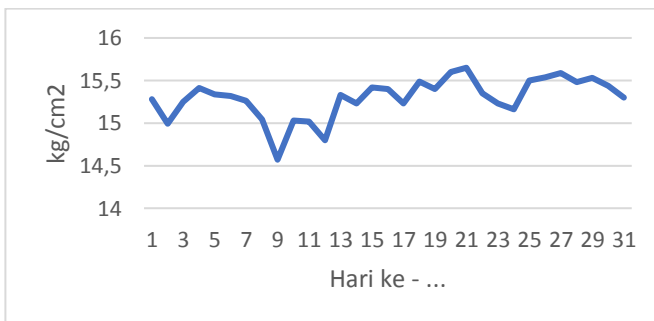
<i>Equipment</i>	<i>Input</i>	<i>Output</i>	<i>Equipment</i>	<i>Input</i>	<i>Output</i>
<i>Preheater</i>	T exhaust Gas	T exhaust gas	<i>LP Economizer</i>	T exhaust gas	T exhaust gas
	$\dot{m}$ feed water	$\dot{m}$ feed water		$\dot{m}$ feed water	$\dot{m}$ feed water
	T feed water	T feed water		T feed water	T feed water
<i>LP Evaporator</i>	T exhaust Gas	T exhaust gas	<i>HP Evaporator</i>	T exhaust Gas	T exhaust gas
	$\dot{m}$ feed water	$\dot{m}$ steam		$\dot{m}$ feed water	$\dot{m}$ steam
	T feed water	T steam		T feed water	T steam
		P steam			P steam
<i>HP Economizer</i>	T exhaust gas	T exhaust gas	<i>Superhater</i>	T exhaust Gas	T exhaust gas
	$\dot{m}$ feed water	$\dot{m}$ feed water		T steam	T steam
	T feed water	T feed water		P steam	P steam

### 3.2 Pengambilan data operasional HRSG

Pengambilan data operasional HRSG dilakukan di *control room* PT. PJB GRESIK. Di dalam HRSG terdapat *tube-tube* yang dialiri air yang berasal dari LP (*low pressure*) drum dan HP (*high pressure*) drum. Panas yang dihasilkan dari perputaran turbin akan dimanfaatkan untuk memanaskan air yang ada di *tube* di dalam HRSG. HRSG terdiri dari peralatan penukar panas yang disusun tegak lurus terhadap arah aliran gas buang. Susunan peralatan penukar panas yang ada didalam HRSG berturut-turut dari atas : *preheater, LP economizer, HP economizer, LP evaporator, HP evaporator, Superheater I.*

Spesifikasi HRSG yang digunakan di PLTGU adalah:

- a. Tipe : *vertical gas flow upward forced circulation dual pressure.*
- b. Konstruksi : *vertical* dengan susunan pipa-pipa mendatar dan *non burner assisted.*
- c. Kemampuan penguapan : HP: 1818 T/H, LP: 48,5 TH
- d. Batasan tekanan uap : HP: 77 Kg/cm<sup>2</sup>, LP: 5,5 Kg/cm<sup>2</sup>
- e. Batasan suhu uap : HP: 507 °C, LP: *saturated*
- f. Jumlah gas : 1500 T/H
- g. Suhu gas (masuk/keluar) : 532 °C/99 °C



**Gambar 3.9** Data input *pressure feed water* pada preheater

Data yang diperoleh dari PT PJB Gresik merupakan data dengan interval waktu satu bulan yaitu 1-31 maret 2019. Berikut merupakan salah satu data yang didapat dari PT PJB Gresik.

Gambar 3.9 merupakan salah satu parameter pada HRSG yaitu tekanan yang masuk pada *preheater*. Sedangkan outputnya ada 4, yaitu *mass flow rate feed water output*, *pressure feed water output*, *temperature feed water output* dan *temperature exhaust gas output*.

**Tabel 3.2** Data operasional proses pada HRSG

<i>Equipment</i>	Parameter	<i>input</i>	<i>output</i>
<i>Preheater</i>	Teg (C)	159.01	121.09
	$\dot{m}_{fw}$ (T/H)	359	122.09
	Tfw (C)	41.02	38.04
LP <i>Economizer</i>	Teg (C)	172.04	159.01
	$\dot{m}_{fw}$ (T/H)	121.05	
	Tfw (C)		160.06
LP <i>Evaporator</i>	Teg (C)	221.07	172.04
	$\dot{m}_{fw}$ (T/H)		
	Tfw (C)	160.06	164.08
	Pst (kg/cm <sup>2</sup> )		
HP <i>Economizer</i>	Teg (C)	268.03	221.07
	$\dot{m}_{fw}$ (T/H)		
	Tfw (C)		164.08
HP <i>Evaporator</i>	Teg (C)	424.04	268.03
	$\dot{m}_{fw}$ (T/H)		
	Tfw (C)	164.08	448
	Pst (kg/cm <sup>2</sup> )	45.11	
<i>Superheater</i>	Teg (C)	490.03	424.03
	Tfw (C)	448	450
	Pst (kg/cm <sup>2</sup> )		42.03

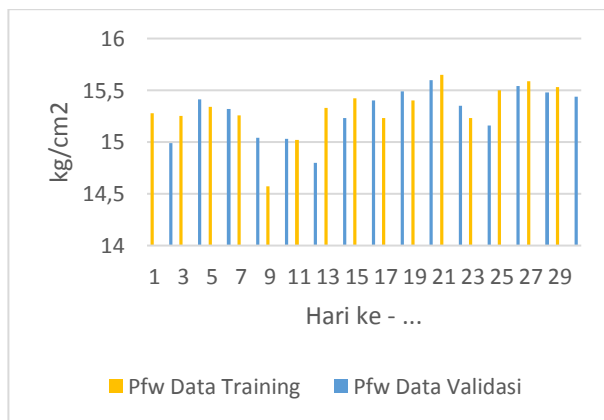
Adapun data yang diperoleh dapat dilihat pada tabel 3.2. karena data yang diperoleh merupakan data interval selama satu bulan, maka diambil data pertama untuk ditampilkan pada tabel tersebut. Data pertama diambil dan disusun pada tabel 3.2, dengan tabel yang mengacu pada parameter HRSG yang berpengaruh seperti ditunjukkan tabel 3.1.

### 3.3 Persiapan data untuk *training* dan validasi

Data *input* dan *output* yang diperoleh dari *control room* perlu dilakukan *training* dan divalidasi untuk penyusunan struktur jaringan syaraf tiruan. *Training* bertujuan untuk mencari nilai bobot dan bias yang sesuai dengan *plant* sesungguhnya.

Data yang siap digunakan yaitu data pada pada bulan Maret 2019 kemudian dibagi menjadi data latih dan data uji. Terdapat beberapa parameter *input* dan *output* pada tiap bagian HRSG. Ditampilkan parameter pada preheater yang berupa *pressure feed water input*. Untuk pembagian data *training* dan validasi dapat dilihat pada gambar 3.10.

Gambar 3.10 merupakan data yang diperoleh selama satu bulan. Data disampling menjadi data *training* dan validasi. Untuk data pada bagian HRSG lain seperti *economizer*, *evaporator* dan *superheater* juga dilakukan *sampling* seperti gambar 3.10.



**Gambar 3.10** Data *training* dan validasi *pressure feed water*

### 3.4 Pemodelan Dinamika HRSG menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan

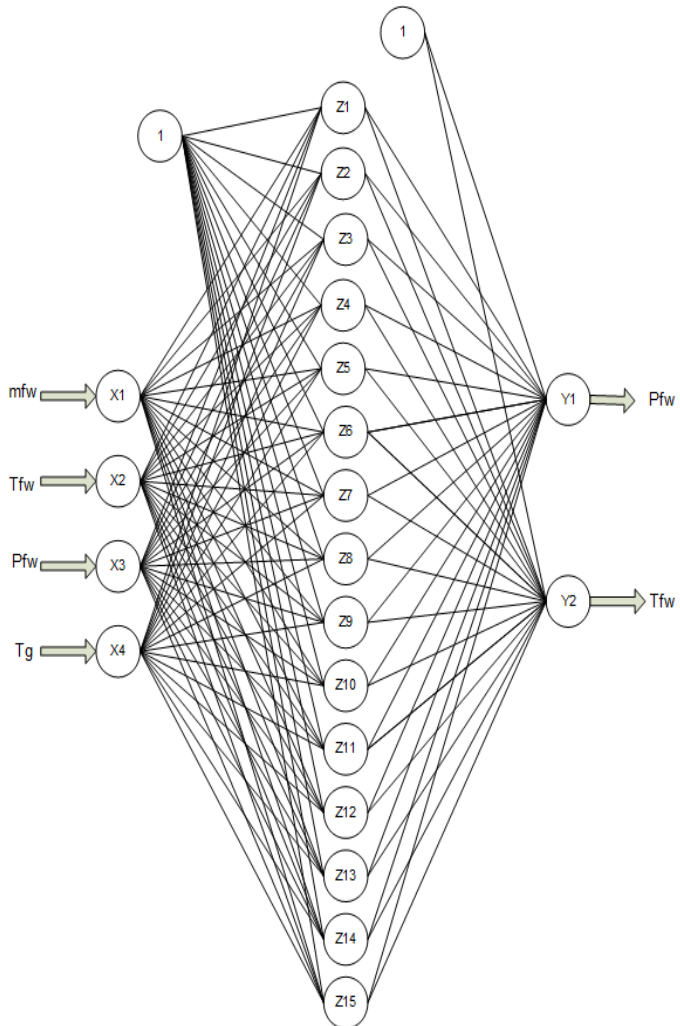
Pemodelan *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) berbasis jaringan syaraf tiruan disusun berdasarkan pasangan data *input output* yang telah dilakukan *training* dan validasi. Tiap komponen memiliki masing-masing pemodelan JST. Arsitekturnya kurang lebih sama yaitu memiliki beberapa *input*, beberapa *hidden node* dan *output*. Dengan arsitektur seperti pada gambar 3.11.

Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB dengan menentukan terlebih dahulu parameter simulasi. Parameter simulasi terdapat pada tabel 3.3.

**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. 40 <i>hidden node</i> )
4	Target MSE	0.01
5	Epoch maksimum	1000
6	Fungsi aktivasi	Tansig, purelin

Data pelatihan yang tersedia diinputkan dalam program MATLAB untuk melatih jaringan syaraf tiruan. Dikarenakan data yang masuk dalam model JST merupakan data normalisasi, maka sebelum digunakan pada proses pelatihan jaringan syaraf tiruan, data pada setiap variabel dinormalisasi pada rentang 0,1 – 0,9 dengan menggunakan persamaan (2.33).



**Gambar 3.11** Arsitektur JST

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BAB IV ANALISA DATA

### 4.1 Simulasi JST menggunakan Toolbox Simulink

Simulasi JST menggunakan *toolbox neural network* pada matlab dilakukan per bagian dalam HRSG.

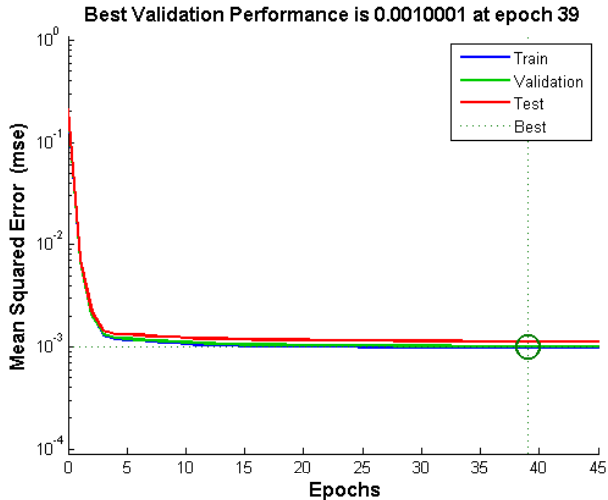
#### 4.1.1 Pelatihan JST *preheater*

Dilakukan simulasi pemodelan JST *preheater* menggunakan *software* matlab dengan variasi *hidden node*. Susunan arsitektur yang digunakan yaitu berdasarkan gambar 3.11 yang mana memiliki *input* berupa *mass flow rate* air, tekanan dan temperatur air, juga temperatur *exhaust gas*. Memiliki beberapa *output* yaitu *mass flow rate* air, tekanan air dan temperatur air hasil pembakaran awal. Kemudian memiliki beberapa *hidden node* yang mana dicari tau terlebih dahulu berapa *hidden node* yang memberikan hasil paling baik. 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 4.1.

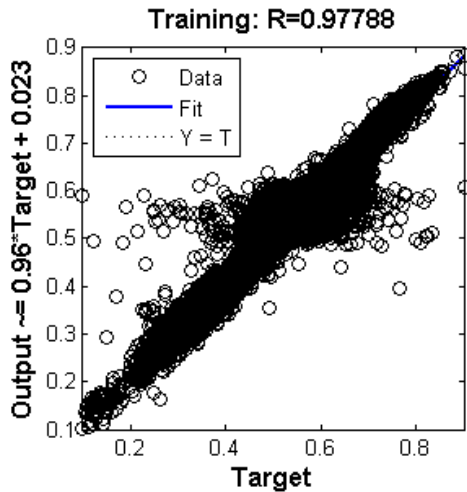
**Tabel 4.1** Nilai MSE Preheater dengan Variasi *Hidden Node*

Hidden Node	Iterasi	<i>Training</i>
1	886	$1.57 \times 10^{-3}$
<b>5</b>	<b>45</b>	<b><math>7.41 \times 10^{-4}</math></b>
10	90	$9.07 \times 10^{-4}$
15	116	$8.53 \times 10^{-4}$
20	19	$8.67 \times 10^{-4}$
25	104	$9.45 \times 10^{-4}$
30	25	$8.40 \times 10^{-4}$
35	38	$7.89 \times 10^{-4}$
40	67	$7.56 \times 10^{-4}$

Dari tabel 4.1 dapat diketahui nilai MSE paling kecil terdapat pada hidden node 5. Pada hidden node 5, dihasilkan dua grafik yaitu grafik performansi dan regresi.



Gambar 4.1 Performansi *preheater*



Gambar 4.2 Regresi *preheater*

Dari gambar 4.1, dapat diketahui bahwa simulasi dengan 5 *hidden node* mampu mencapai *error* minimal yaitu  $7,41 \times 10^{-4}$ . Sedangkan untuk grafik regresi dapat dilihat pada gambar 4.2.

Dari Gambar 4.2 di atas, dapat diketahui bahwa dengan 5 *hidden node* memiliki nilai R sebesar 0,97788. Dikarenakan nilai R yang mendekati nilai 1, maka dapat dikatakan model JST dengan 5 *hidden node* yang telah dirancang mampu melakukan estimasi dengan sangat baik.

#### 4.1.2 Pelatihan JST LP *Economizer*

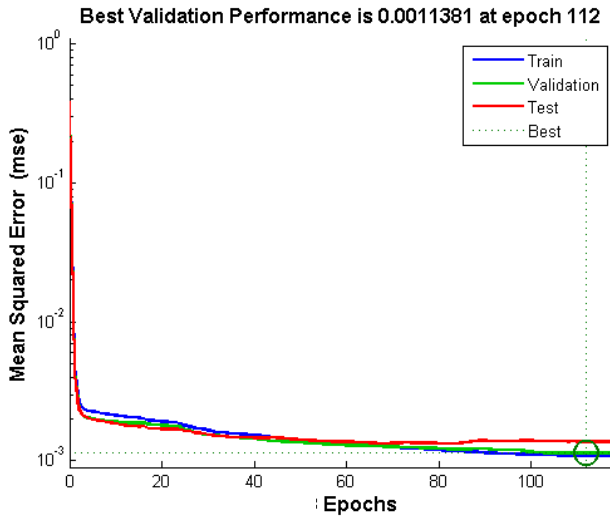
Selanjutnya yaitu dilakukan simulasi pemodelan JST LP *economizer* menggunakan *software* matlab dengan variasi *hidden node* seperti sebelumnya. Tujuan dari dilakukannya simulasi dengan variasi *hidden node* adalah untuk menentukan nilai MSE paling kecil. Yang mana nilai MSE hasil simulasi LP *economizer* dapat dilihat pada tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Nilai MSE LP *Economizer* dengan variasi *hidden node*

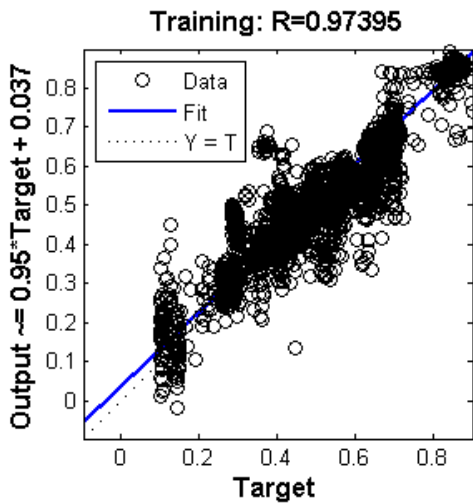
Hidden Node	Iterasi	<i>Training</i>
1	10	$2.92 \times 10^{-3}$
5	27	$1.94 \times 10^{-3}$
10	39	$1.50 \times 10^{-3}$
<b>15</b>	<b>118</b>	<b><math>1.00 \times 10^{-3}</math></b>
20	113	$1.14 \times 10^{-3}$
25	101	$1.11 \times 10^{-3}$
30	51	$1.08 \times 10^{-3}$
35	61	$1.10 \times 10^{-3}$
40	45	$1.15 \times 10^{-3}$

Dari tabel 4.2 dapat diketahui nilai MSE paling kecil terdapat pada *hidden node* 15. Kemudian dilakukan simulasi pada *software* matlab dan menghasilkan dua grafik yaitu grafik

performansi dan regresi.



Gambar 4.3 Performansi *lp economizer*



Gambar 4.4 Regresi *lp economizer*

Dari gambar 4.3 dan 4.4, dapat diketahui bahwa JST yang dirancang sudah cukup baik. Dilihat dari nilai MSE yang kecil dan nilai R yang mendekati 1.

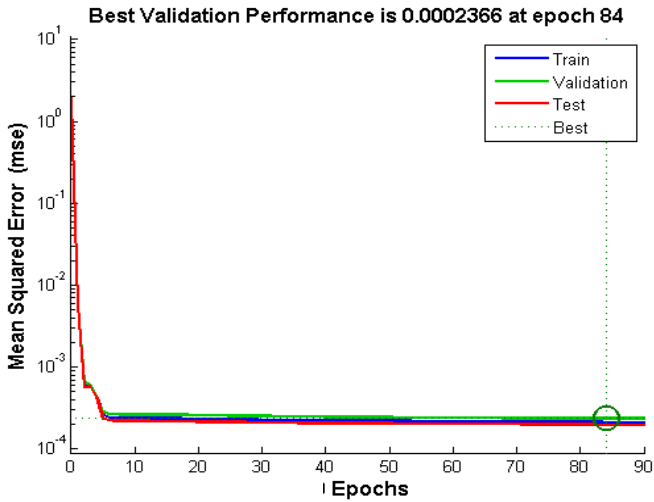
#### 4.1.3 Pelatihan JST LP *evaporator*

Selanjutnya yaitu dilakukan simulasi pemodelan JST LP *evaporator* menggunakan *software* matlab dengan variasi *hidden node*. Tujuan dari dilakukannya simulasi dengan variasi *hidden node* adalah untuk menentukan nilai MSE paling kecil. Yang mana nilai MSE dapat dilihat pada tabel 4.3.

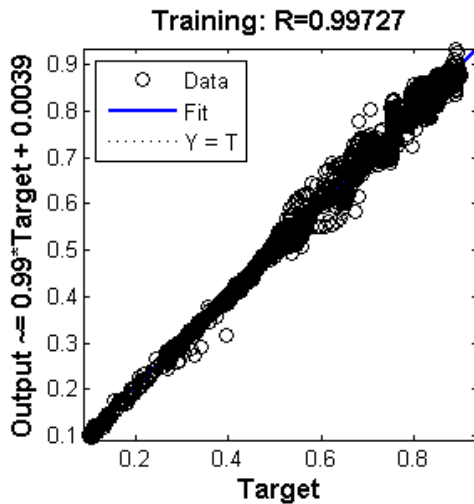
**Tabel 4.3** Nilai MSE LP *evaporator* dengan variasi *hidden node*

Hidden Node	Iterasi	<i>Training</i>
1	17	$3.05 \times 10^{-4}$
5	106	$2.43 \times 10^{-4}$
10	231	$2.25 \times 10^{-4}$
15	31	$2.49 \times 10^{-4}$
20	23	$2.41 \times 10^{-4}$
25	128	$1.99 \times 10^{-4}$
30	124	$2.12 \times 10^{-4}$
<b>35</b>	<b>90</b>	<b><math>1.18 \times 10^{-4}</math></b>
40	31	$2.25 \times 10^{-4}$

Dari tabel 4.3 dapat diketahui nilai MSE paling kecil terdapat pada *hidden node* 35. Kemudian dilakukan simulasi pada *software* matlab dan menghasilkan dua grafik yaitu grafik performansi dan regresi.



Gambar 4.5 Performansi lp *evaporator*



Gambar 4.6 Regresi lp *evaporator*

Dari gambar 4.5 dan 4.6, dapat diketahui bahwa JST yang

dirancang sudah cukup baik. Dilihat dari nilai MSE yang kecil dan nilai R yang mendekati 1.

#### 4.1.4 Pelatihan JST *HP economizer*

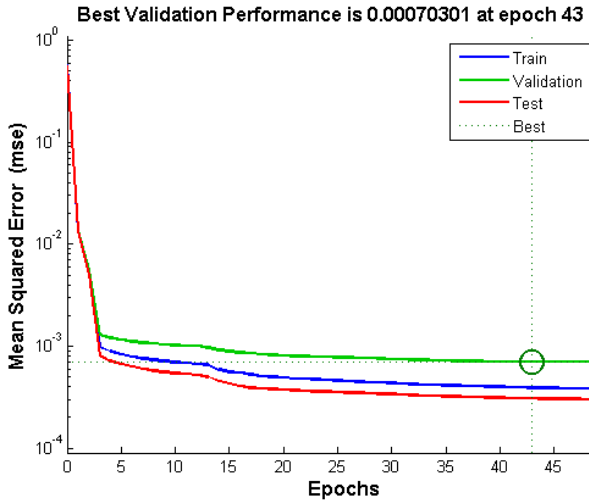
Selanjutnya yaitu dilakukan simulasi pemodelan JST *HP economizer* menggunakan *software* matlab dengan variasi *hidden node*. Tujuan dari dilakukannya simulasi dengan variasi *hidden node* adalah untuk menentukan nilai MSE paling kecil. Yang mana nilai MSE dapat dilihat pada tabel 4.4.

**Tabel 4.4** Nilai MSE *hp economizer* dengan variasi *hidden node*

Hidden Node	Iterasi	Training
1	70	$1.45 \times 10^{-3}$
5	602	$5.03 \times 10^{-4}$
10	104	$5.00 \times 10^{-4}$
15	130	$4.07 \times 10^{-4}$
20	118	$4.27 \times 10^{-4}$
25	115	$3.99 \times 10^{-4}$
30	100	$4.03 \times 10^{-4}$
35	49	$4.47 \times 10^{-4}$
<b>40</b>	<b>49</b>	<b><math>3.91 \times 10^{-4}</math></b>

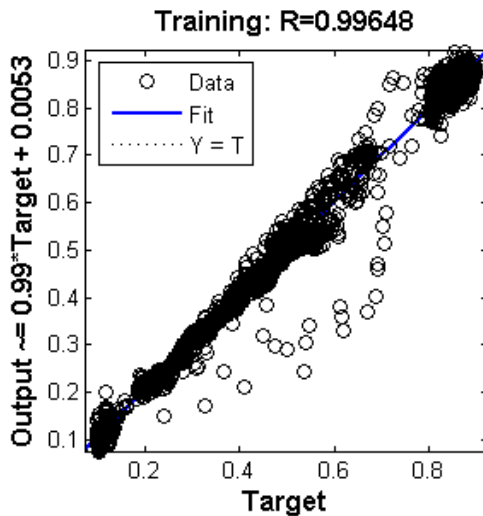
Dari tabel 4.4 dapat diketahui nilai MSE paling kecil terdapat pada hidden node 40 yaitu sebesar  $3.91 \times 10^{-4}$ . Kemudian dilakukan simulasi pada *software* matlab dan menghasilkan dua grafik yaitu grafik performansi dan regresi.

Untuk grafik performance dapat dilihat pada gambar 4.7.



**Gambar 4.7** Performansi *HP Economizer*

Sedangkan untuk grafik regresi dapat dilihat pada gambar 4.8.



**Gambar 4.8** Regresi *HP Economizer*



Dari gambar 4.7 dan 4.8, dapat diketahui bahwa JST yang dirancang sudah cukup baik. Dilihat dari nilai MSE yang kecil dan nilai R yang mendekati 1.

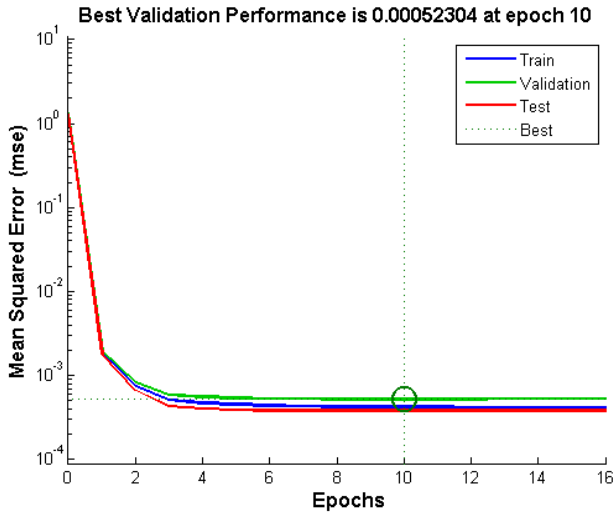
#### 4.1.5 Pelatihan JST HP *evaporator*

Selanjutnya yaitu dilakukan simulasi pemodelan JST HP *evaporator* menggunakan *software* matlab dengan variasi *hidden node*. Tujuan dari dilakukannya simulasi dengan variasi *hidden node* adalah untuk menentukan nilai MSE paling kecil. Yang mana nilai MSE dapat dilihat pada tabel 4.5.

**Tabel 4.5** Nilai MSE HP *Evaporator* dengan Variasi *Hidden Node*

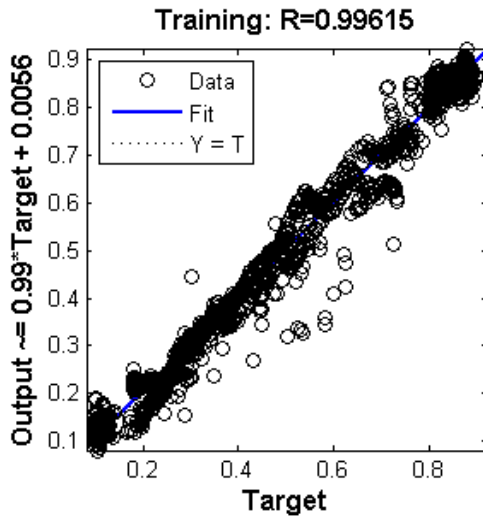
Hidden Node	Iterasi	<i>Training</i>
1	10	$6.41 \times 10^{-4}$
5	12	$4.98 \times 10^{-4}$
10	156	$3.78 \times 10^{-4}$
15	83	$4.00 \times 10^{-4}$
20	46	$3.93 \times 10^{-4}$
<b>25</b>	<b>16</b>	<b><math>3.18 \times 10^{-4}</math></b>
30	27	$3.67 \times 10^{-3}$
35	57	$4.22 \times 10^{-4}$
40	21	$4.02 \times 10^{-4}$

Dari tabel 4.5 dapat diketahui nilai MSE paling kecil terdapat pada *hidden node* 25. Kemudian dilakukan simulasi pada *software* matlab dan menghasilkan dua grafik yaitu grafik performansi dan regresi. Untuk performansi dapat dilihat di gambar 4.9 dan regresi pada 4.10.



**Gambar 4.9** Performansi HP *evaporator*

Sedangkan untuk grafik regresi dapat dilihat pada gambar 4.10.



**Gambar 4.10** Grafik regresi HP Evaporator

Dari gambar 4.9 dan 4.10, dapat diketahui bahwa JST yang dirancang sudah cukup baik. Dilihat dari nilai MSE yang kecil dan nilai R yang mendekati 1.

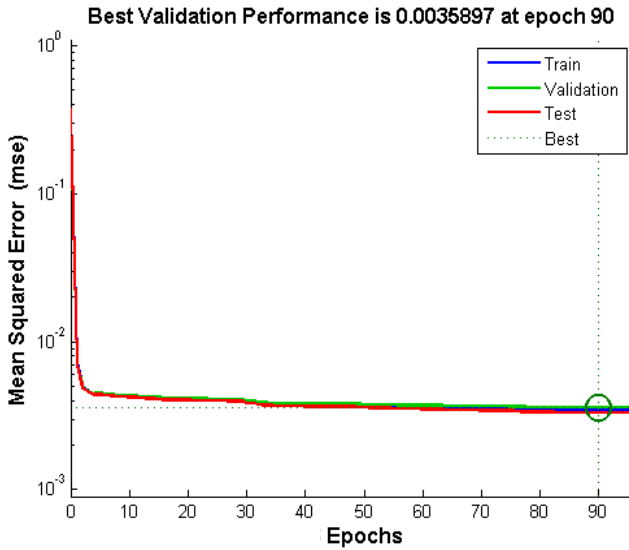
#### 4.1.6 Pelatihan JST *superheater*

Selanjutnya yaitu dilakukan simulasi pemodelan JST *superheater* menggunakan *software* matlab dengan variasi *hidden node*. Tujuan dari dilakukannya simulasi dengan variasi *hidden node* adalah untuk menentukan nilai MSE paling kecil. Yang mana nilai MSE dapat dilihat pada tabel 4.6.

**Tabel 4.6** Nilai MSE *Superheater* dengan Variasi *Hidden Node*

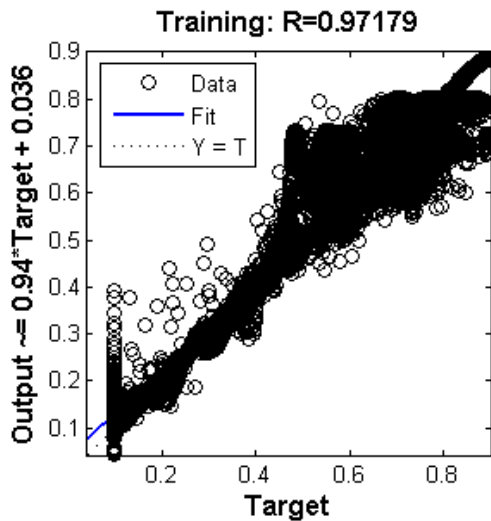
Hidden Node	Iterasi	<i>Training</i>
1	10	$5.18 \times 10^{-3}$
5	262	$3.81 \times 10^{-3}$
10	114	$3.46 \times 10^{-3}$
15	133	$3.33 \times 10^{-3}$
<b>20</b>	<b>96</b>	<b><math>3.32 \times 10^{-3}</math></b>
25	201	$3.45 \times 10^{-3}$
30	163	$3.40 \times 10^{-3}$
35	136	$3.34 \times 10^{-3}$
40	148	$3.38 \times 10^{-3}$

Dari tabel 4.6 dapat diketahui nilai MSE paling kecil terdapat pada *hidden node* 20. Kemudian dilakukan simulasi pada *software* matlab dan menghasilkan dua grafik yaitu grafik performansi dan regresi. Untuk grafik performansi dapat dilihat pada gambar 4.11.



**Gambar 4.11** Grafik performansi *superheater*

Sedangkan untuk grafik regresi dapat dilihat pada gambar 4.12.



**Gambar 4.12** Grafik regresi *superheater*

Dari gambar 4.11 dan 4.12 di atas, dapat diketahui bahwa JST yang dirancang sudah cukup baik. Dilihat dari nilai MSE yang kecil dan nilai R yang mendekati 1.

Dari keseluruhan bagian HRSG yang meliputi *preheater*, *LP economizer*, *LP evaporator*, *HP economizer*, *HP evaporator* dan *superheater*, jika disimpulkan nilai MSE dan regresi terbaik maka menghasilkan tabel 4.7.

**Tabel 4.7** Nilai MSE dan Regresi Bagian HRSG Keseluruhan

Bagian	<i>Hidden Node</i>	MSE	Regresi
<i>Preheater</i>	5	$9.75 \times 10^{-4}$	0.97896
<i>LP Economizer</i>	15	$1.10 \times 10^{-3}$	0.97395
<i>LP Evaporator</i>	20	$2.12 \times 10^{-4}$	0.99727
<i>HP Economizer</i>	40	$3.91 \times 10^{-4}$	0.99649
<i>HP Evaporator</i>	25	$4.22 \times 10^{-4}$	0.99615
<i>Superheater</i>	20	$3.45 \times 10^{-3}$	0.97179

Tabel 4.7 menjelaskan secara keseluruhan performansi dari simulasi jst yang telah dilakukan. MSE keseluruhan memiliki nilai yang kecil yaitu  $10^{-3}$  untuk *superheater* dan *lp economizer* dan  $10^{-4}$  untuk bagian yang lain. Hal ini menunjukkan jst dapat digunakan untuk menganalisa kinerja HRSG dengan sangat baik. Begitupun dengan nilai regresi yang dihasilkan. Keseluruhan menunjukkan bahwa nilai yang dihasilkan adalah 0,9, yang artinya hampir mendekati 1. Hal ini sangat baik karena apabila nilai regresi

mendekati 1, simulasi jst sudah bekerja sangat baik.

Setelah dilakukan pelatihan tiap bagian dari HRSG, selanjutnya adalah validasi hasil.

## 4.2 Validasi

Metode untuk memvalidasi sama dengan training. Dicari jumlah *hidden node* tiap bagian kemudian dilakukan simulasi. Dengan begitu diketahui JST terbaik.

### 4.2.1 Validasi JST *preheater*

Dilakukan validasi pemodelan JST *preheater* 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 4.8.

**Tabel 4.8** Nilai MSE Validasi *Preheater* dengan Variasi *Hidden Node*

Hidden Node	Iterasi	Validasi
1	886	$1.50 \times 10^{-3}$
<b>5</b>	<b>45</b>	<b><math>7.89 \times 10^{-4}</math></b>
10	90	$9.70 \times 10^{-4}$
15	116	$8.97 \times 10^{-4}$
20	19	$9.40 \times 10^{-4}$
25	104	$8.79 \times 10^{-4}$
30	25	$9.60 \times 10^{-4}$
35	38	$8.51 \times 10^{-4}$
40	67	$1.00 \times 10^{-3}$

Dari tabel 4.1 dapat diketahui nilai MSE paling kecil terdapat pada *hidden node* 5. JST dijalankan lagi menggunakan 5 *hidden node* dan dihasilkan nilai *output* prediksi dari *preheater*. Nilai prediksi *output* dari *preheater* akan digunakan sebagai nilai

*input* untuk LP *economizer* dan HP *economizer*.

#### 4.2.2 Validasi JST LP *economizer*

Selanjutnya dilakukan validasi pemodelan JST LP *economizer* 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 4.9.

**Tabel 4.9** Nilai MSE LP *Economizer* dengan Variasi *Hidden Node*

Hidden Node	Iterasi	Validasi
1	10	$2.83 \times 10^{-3}$
5	27	$2.20 \times 10^{-3}$
10	39	$1.77 \times 10^{-3}$
<b>15</b>	<b>118</b>	<b><math>1.14 \times 10^{-3}</math></b>
20	113	$1.27 \times 10^{-3}$
25	101	$1.36 \times 10^{-3}$
30	51	$1.35 \times 10^{-3}$
35	61	$1.79 \times 10^{-3}$
40	45	$1.37 \times 10^{-3}$

Dari tabel 4.9, diketahui nilai MSE terbaik terdapat pada *hidden node* ke-15. JST dijalankan lagi menggunakan 15 *hidden node* dan dihasilkan nilai prediksi *output* LP *economizer*. Nilai prediksi *output* LP *economizer* digunakan untuk *input* dari LP *evaporator*.

#### 4.2.3 Validasi JST LP *evaporator*

Selanjutnya dilakukan validasi pemodelan JST LP *evaporator* 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 4.10.

**Tabel 4.10** Nilai MSE LP *Evaporator* dengan Variasi *Hidden Node*

Hidden Node	Iterasi	Validasi
1	17	$3.37 \times 10^{-4}$
5	106	$2.48 \times 10^{-4}$
10	231	$2.17 \times 10^{-4}$
15	31	$2.28 \times 10^{-4}$
20	23	$2.28 \times 10^{-4}$
25	128	$1.95 \times 10^{-4}$
30	124	$2.37 \times 10^{-4}$
<b>35</b>	<b>90</b>	<b><math>1.91 \times 10^{-4}</math></b>
40	31	$2.22 \times 10^{-4}$

Dari tabel 4.10, diketahui nilai MSE terbaik terdapat pada *hidden node* ke-35. JST dijalankan lagi menggunakan 35 *hidden node* dan dihasilkan nilai prediksi *output* LP *evaporator*. Nilai tersebut merupakan *output* akhir hasil pemanasan *feed water low pressure* oleh HRSG.

#### 4.2.4 Validasi JST *HP economizer*

Selanjutnya dilakukan validasi pemodelan JST *hp economizer* 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 4.11.

**Tabel 4.11** Nilai MSE *HP Economizer* dengan Variasi *Hidden Node*

Hidden Node	Iterasi	Validasi
1	70	$1.65 \times 10^{-3}$
5	602	$4.32 \times 10^{-4}$
10	104	$4.09 \times 10^{-4}$
15	130	$4.84 \times 10^{-4}$
20	118	$5.21 \times 10^{-4}$
25	115	$7.03 \times 10^{-4}$
30	100	$4.41 \times 10^{-4}$
35	49	$6.06 \times 10^{-4}$
<b>40</b>	<b>49</b>	<b><math>3.00 \times 10^{-4}</math></b>

Dari tabel 4.11, diketahui nilai MSE terbaik terdapat pada *hidden node* ke-40. JST dijalankan lagi menggunakan 40 *hidden node* dan dihasilkan nilai prediksi *output HP economizer*. Nilai prediksi *output* dari *HP economizer* digunakan sebagai *input* untuk *HP evaporator*.

#### 4.2.5 Validasi JST *HP evaporator*

Selanjutnya dilakukan validasi pemodelan JST hp *economizer* 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 4.12.

Dari tabel 4.12, diketahui nilai MSE terbaik terdapat pada *hidden node* ke-25. JST dijalankan lagi menggunakan 25 *hidden node* dan dihasilkan nilai prediksi *output* HP *evaporator*. Nilai prediksi *output* dari HP *evaporator* digunakan sebagai *input* untuk *superheater*.

**Tabel 4.12** Nilai MSE HP *Evaporator* dengan Variasi *Hidden Node*

Hidden Node	Iterasi	Validasi
1	10	$5.39 \times 10^{-4}$
5	12	$5.46 \times 10^{-4}$
10	156	$4.12 \times 10^{-4}$
15	83	$5.23 \times 10^{-4}$
20	46	$4.02 \times 10^{-4}$
<b>25</b>	<b>16</b>	<b><math>3.61 \times 10^{-4}</math></b>
30	27	$4.09 \times 10^{-4}$
35	57	$3.76 \times 10^{-4}$
40	21	$3.94 \times 10^{-4}$

#### 4.2.6 Validasi JST *Superheater*

Selanjutnya dilakukan validasi pemodelan JST *superheater* 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 4.13.

Dari tabel 4.13, diketahui nilai MSE terbaik terdapat pada *hidden node* ke-20. JST dijalankan lagi menggunakan 20 *hidden node* dan dihasilkan nilai prediksi *output* hp *economizer*. Nilai prediksi *output* dari *superheater* merupakan *output* akhir dari proses pemanasan *feed water high pressure* oleh HRSG.

**Tabel 4.13** Nilai MSE *Superheater* dengan Variasi *Hidden Node*

Hidden Node	Iterasi	Validasi
1	10	$5.43 \times 10^{-3}$
5	262	$3.90 \times 10^{-3}$
10	114	$3.54 \times 10^{-3}$
15	133	$3.45 \times 10^{-3}$
<b>20</b>	<b>96</b>	<b><math>3.20 \times 10^{-3}</math></b>
25	201	$3.22 \times 10^{-3}$
30	163	$3.39 \times 10^{-3}$
35	136	$3.45 \times 10^{-3}$
40	148	$3.59 \times 10^{-3}$

**Tabel 4.14** Nilai MSE dan Regresi Bagian HRSG Keseluruhan

Bagian	Hidden Node	MSE Validasi
<i>Preheater</i>	5	$7.89 \times 10^{-4}$
<i>LP economizer</i>	15	$1.14 \times 10^{-3}$
<i>LP evaporator</i>	20	$1.91 \times 10^{-4}$
<i>HP economizer</i>	40	$3.00 \times 10^{-4}$
<i>HP evaporator</i>	25	$3.61 \times 10^{-4}$
<i>Superheater</i>	20	$3.20 \times 10^{-3}$

Nilai MSE keseluruhan digabung jadi satu pada tabel 4.14.

Tabel 4.7 menjelaskan secara keseluruhan performansi dari simulasi JST yang telah dilakukan. MSE keseluruhan memiliki nilai yang kecil yaitu  $10^{-3}$  untuk LP *economizer* dan *superheater* dan  $10^{-4}$  untuk bagian yang lain. Hal ini menunjukkan JST dapat digunakan untuk menganalisa kinerja HRSG dengan sangat baik.

### 4.3 Analisa Kinerja HRSG

Selanjutnya yaitu menghitung efisiensi HRSG berdasarkan *output* yang dihasilkan pada tiap bagian. Pada simulasi JST tiap bagian telah dihasilkan nilai prediksi *output* yang menjadi *input* pada bagian selanjutnya. Maka dari seluruh *output* yang telah diprediksi oleh JST, akhirnya dapat dihitung nilai efisiensi sebagai *output* akhir. Dilakukan perhitungan dengan bantuan *software excel* menggunakan persamaan (2.9). dari perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan nilai efisiensi hasil prediksi. Sebelumnya juga telah dilakukan perhitungan efisiensi *real*. Perhitungan efisiensi *real* menggunakan data *real* dari *plant*. Nilai *output real* dan *output* hasil prediksi JST dibandingkan untuk melihat perbedaannya. Nilai efisiensi dapat dilihat pada tabel 4.15 dan grafik perbandingan nilai efisiensi di gambar 4.13.

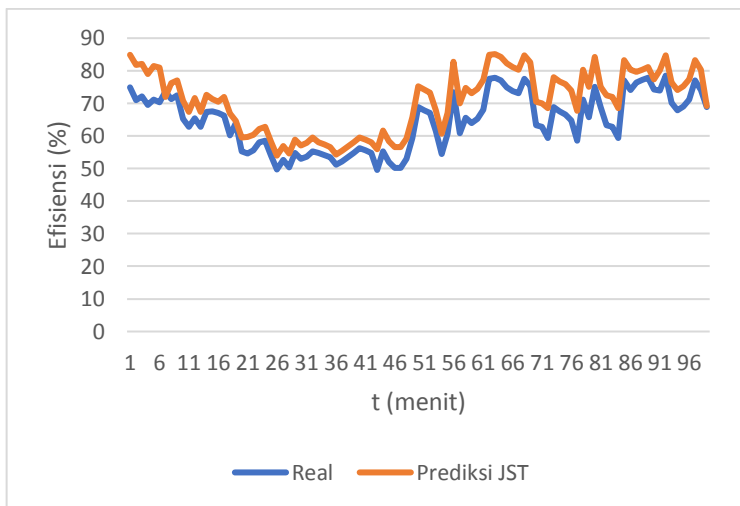
Tabel 4.15 menjelaskan nilai efisiensi aktual (*real*) dan nilai efisiensi prediksi yang dihasilkan JST. Dari nilai tersebut, dibuat grafik seperti pada Gambar 4.13.

Besarnya laju energi gas buang pada HRSG mengalami perubahan setiap saat. Bahkan di gambar 4.13, terdapat nilai efisiensi yang sangat rendah yaitu sekitar 50%. Nilai tersebut tergolong sangat rendah jika dibandingkan dengan nilai sebelum dan sesudahnya. Hal ini terjadi akibat adanya perubahan laju aliran massa bahan bakar yang berbeda-beda setiap saat dan juga akibat adanya tingkat keadaan gas buang yang ada dalam HRSG. Akibatnya laju energi gas buang yang diserap oleh air untuk proses pembentukan uap juga mengalami perubahan. Akibat yang ditimbulkan dari peristiwa ini adalah efisiensi HRSG juga mengalami perubahan setiap saat sesuai dengan kondisi yang

terjadi pada saat itu.

**Tabel 4.15** Nilai efisiensi HRSG

No.	<i>Real</i>	Prediksi JST
1	74,93769	84,87609321
2	71,04825	81,80260114
3	72,08391	82,18035661
4	69,52825	79,00179292
5	71,18727	81,50168719
6	70,3537	80,91800931
7	73,59591	71,88519056
8	71,33119	76,22906109
9	72,45112	77,09117813
...	...	...
100	64,54799	71,18790112



**Gambar 4.13** Perubahan nilai efisiensi hasil pemodelan JST

Gambar 4.13 menunjukkan nilai efisiensi yang dihasilkan oleh pemodelan JST. Berdasarkan simulasi pada tiap komponen yang telah dilakukan pada subbab sebelumnya, didapatkan prediksi nilai efisiensi yang ditunjukkan pada tabel 4.7 dan gambar 4.13. Dari tabel dan gambar tersebut, dapat diketahui bahwa nilai prediksi yang dihasilkan oleh JST, memiliki selisih yang kecil dengan nilai efisiensi *real*. Hal itu terjadi karena pada tiap komponen HRSG didapatkan nilai MSE yang sangat kecil dan nilai regresi yang mendekati 1. Dikarenakan nilai MSE yang kecil dan regresi yang mendekati 1, maka pemodelan JST dapat bekerja dengan baik dalam mengestimasi kinerja HRSG.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

Dalam penelitian tugas akhir ini telah dilakukan penyusunan model dinamika HRSG dalam bentuk jaringan syaraf tiruan dan estimasi kinerja HRSG melalui pemodelan JST menggunakan *software* matlab. Hasilnya menunjukkan bahwa :

- a. Nilai MSE yang dihasilkan tiap bagian HRSG berbeda-beda namun masih ditoleransi sehingga dapat digunakan untuk memprediksi kinerja HRSG dengan baik. Dengan rincian MSE *preheater* sebesar  $9.75 \times 10^{-4}$ , MSE LP *economizer* sebesar  $1.10 \times 10^{-3}$ , MSE LP evaporator sebesar  $2.12 \times 10^{-4}$ , MSE HP *economizer* sebesar  $3.91 \times 10^{-4}$ , MSE HP evaporator sebesar  $4.22 \times 10^{-4}$  dan MSE *superheater* sebesar  $3.45 \times 10^{-3}$ .
- b. Efisiensi kinerja HRSG pada PLTGU mengalami perubahan tiap waktunya dengan nilai tertinggi 85% dan terendah 50%. Hal ini disebabkan adanya perubahan laju energi gas buang yang terjadi setiap saat.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR PUSTAKA

- Azid, Ripin, Aris, Ahmad, Seetharamu, & Yusoff. (2015). Predicting Combined-Cycle Natural Gas Power Plant Emissions by Using Artificial Neural Networks. 512-517.
- Deshpande, P., Warke, N., Khandare, P., & Deshpande, V. (2012). Thermal Power Plant Analysis Using Artificial Neural Network. *Nirma University International Conference on Engineering*.
- Fausett, L. (1994). *Fundamentals of Neural Network Architecture, Algorithms, and Application*. Prentice Hall.
- Firdaus, M. (2010). *Penentuan Beban Optimal pada Turbin Gas PLTGU dengan Menggunakan Nonlinear Programming*. Depok: Program Studi Teknik Industri UI.
- Herawan, S., Talib, K., Shamsudin, S., Putra, A., Musthafah, & Ismail, F. (2016). Prediction of Steam Turbine Performance as a Waste Heat Recovery Mechanism on Naturally Aspirated Spark Ignition Engine Using Artificial Neural Network. *International Conference on Soft Computing & Machine Intelligence*, 164-168.
- Kljajic, Gvozdenac, D., & Vukmirovic, S. (2012). Use of Neural Networks for modeling and predicting boiler's operating performance. *energy* 45, 304-311.
- Mohanraj, Jayaraj, & Muraleedharan. (2015). Applications of artificial neural networks for thermal analysis of heat exchangers. *International Journal of Thermal Sciences*(90), 150-172.
- Montesdeoca-Contreras, J. C., Zambrano-Abad, J. C., Morales-Garcia, J. A., & Ávila-Campoverde, R. S. (2014). Virtual Speed Sensor for DC Motor using Back-Propagation Artificial Neural Networks. *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*. Ixtapa, Mexico: IEEE.
- Nordin, A., & Majid, A. (2015). Performance Assessment of Heat

- Recovery Steam Generator at District Cooling Plant. *ARPN journal of Engineering and Applied Science*, 10196-10199.
- Oktakaisar, A., Supari, & Suprijono, H. (2015). Perancangan Sistem Pemodelan Kontrol Level Air Steam Drum berbasis Jaringan Syaraf Tiruan . *Jurnal Teknik Elektro*, 1-6.
- Papantoniou, S., & Kolokotsa, D. (2015). Prediction of Outdoor Air Temperature Using Neural Networks; Application in 4 European Cities. *Energy & Buildings*, 1-31.
- PJB. (t.thn.). *Operasi Pembangkit*. Gresik: PT PJB.
- Putra, B. (2016). Evaluasi Korosi pada Bagian Luar Tube HRSG dan Metode Pencegahan (Studi Kasus pada PLTGU PT. PJB UP Gresik). Surabaya.
- Rashid, Kamal, Zafar, Sheikh, Shah, & Mathavan. (2015). Energy Prediction of a Combined Cycle Power Plant Using a Particle Swarm Optimization Trained feedForward Neural Network. *International conference on Mechanical Engineering, automation and Control System*.
- Satria, D. (2013). Sistem turbin gas pada sistem PLTGU. *Teknik Mesin Universitas Diponegoro*, III(15), 50-62.
- Selvi, T., Kalpana, & Thyagarajan. (2017). Modelling and Prediction of Boiler Drum in a Thermal Power Plant. *IEEE*.
- Styoko, B. (2006). Analisa Efisiensi Performa HRSG. *Jurnal Traksi*, 4(2), 56-60.
- Tang, Z., Zhang, H., & Yang, H. (2017). Artificial Neural Networks Model for Predicting Oxygen Content In Flue Gas of Power Plant. *Chinese Control and Decision Conference*, 1379-1382.
- Utama, D. Y. (2013). *SISTEM TURBIN GAS PADA PLTGU*. SEMARANG: UNIVERSITAS DIPONEGORO.

## LAMPIRAN A DATA PROSES

No.	Preheater							
	mfw.i	Pfw.i	Tfw.i	Teg.i	mfw.o	Pfw.o	Tfw.o	Teg.o
1	359	15,28	41,2	159,1	122,9	38,4	367	
2	384	15,25	41,5	159,4	122,4	39	389	
3	357	15,34	41,9	158,4	123	39	366	
4	362	15,26	41,5	158,9	124,1	38,7	371	
5	458	14,57	42,5	161,1	123,6	39,4	466	
6	405	15,02	42,8	161,3	122,5	40,2	410	
7	351	15,33	42,4	159,1	120	39,5	358	
8	359	15,42	42	159	123,4	39,2	361	
9	380	15,23	42,1	158,7	122,5	39,5	383	
10	347	15,4	41,4	157,8	121,5	38,6	355	
11	321	15,65	41,8	156,7	119,9	38,4	329	
12	374	15,23	41,8	156,6	120,8	38,1	381	
13	341	15,5	41,4	156,6	120,6	38,4	349	
14	329	15,59	41,3	156,4	120,7	38,2	339	
15	336	15,53	41,3	156,7	119,6	38,1	343	
16	370	15,3	42	156,3	119,8	38,3	378	
17	336	15,51	41,4	156,3	120,9	38,3	339	
18	330	15,6	41,3	156,8	120,7	38,3	338	
19	334	15,57	42	156,8	120,2	39,1	337	
20	361	15,28	42	156,7	120,5	38,7	364	
21	367	15,23	41,8	156,5	120,8	39,1	376	
22	334	15,52	41,8	156,2	120,4	38,9	340	
23	329	15,5	41,7	156,2	120,2	38,9	330	
24	325	15,5	42	156,9	120,6	38,8	335	
25	361	15,23	41,2	156,8	120	38	370	

No.	Preheater							
	mfw.i	Pfw.i	Tfw.i	Teg.i	mfw.o	Pfw.o	Tfw.o	Teg.o
26	369	15,3	41,7	156,9	121	38,9	378	
27	332	15,6	41,5	156,9	120,7	38,6	338	
28	326	15,5	41,7	157	120,6	39	337	
29	338	15,6	41,1	156,7	120,4	38	337	
30	335	15,5	41	156,9	120,5	38,3	340	
31	370	15,2	41,6	156,3	120,6	38,3	380	
32	377	15,2	41,7	156,5	120,7	38,8	381	
33	338	15,4	41,5	156,9	120,5	38,8	348	
34	328	15,5	41,6	156,8	120	38,6	336	
35	324	15,5	41,8	156,5	120	38,6	331	
36	328	15,5	41,9	156,7	119,6	38,7	334	
37	388	15,2	41,2	156,8	120,4	38,3	389	
38	340	15,4	41,7	156,8	120,6	38	348	
39	333	15,5	41,7	156,6	119,4	38,7	338	
40	336	15,6	41,1	156,6	120	38,4	339	
41	295	15,9	41,3	156,5	121,6	37,6	304	
42	341	15,4	40,2	156,8	126,9	36,8	347	
43	287	15,7	40,3	156,4	126,6	37,3	293	
44	277	15,8	41	156,5	125,7	37,3	282	
45	278	15,9	40,8	156,8	126,3	37	284	
46	298	15,6	41	156,8	126,8	37,3	303	
47	340	15,5	40,4	157,1	126,9	37,7	343	
48	322	15,6	40,9	156,5	120,6	38	326	
49	329	15,6	41,7	156,7	120,9	38,7	335	
50	378	15,7	41,1	156,9	120,4	38,4	385	

No	LP ECONOMIZER					
	mfw.in	Pfw.in	Teg.in	Pfw.out	Tfw.out	Teg.out
1	121,5	16,1	172,4	14,6	160,6	221,7
2	93,5	16,4	173,2	14,7	158,1	221,3
3	122,2	16,2	172,7	14,7	160,6	221,1
4	124,9	16,1	173,1	14,6	160,7	222,2
5	102,8	16,2	175	14,4	160,9	224,7
6	95,2	16,4	174,6	14,6	160,3	224,1
7	128,7	16,1	172,5	14,6	158,3	220,2
8	129,8	16,2	172,3	14,7	160,5	220,2
9	126,3	16,1	172	14,6	159,3	220,6
10	124,6	16,1	171	14,6	157,9	219
11	111,3	16,3	170,4	14,9	159	218,3
12	121,3	16,2	170,4	14,8	158,4	218,1
13	115,7	16,2	170,4	14,9	158,7	217,6
14	116,1	16,2	170,3	14,8	158,9	217,8
15	115,5	16,2	170,3	14,8	158,9	217,5
16	120,9	16,2	170,5	14,8	158,8	217,3
17	116,3	16,2	170,4	14,8	158,2	217,8
18	115,4	16,3	170,3	14,9	158,9	217,5
19	114,6	16,2	170	14,9	158,5	217,5
20	114,8	16,2	169,8	14,8	158,9	217,9
21	119,6	16,1	170,4	14,8	159,1	217,5
22	115,7	16,2	170,4	14,8	159,1	217,2
23	115,4	16,2	170,3	14,8	159	217,3
24	114,7	16,2	170,2	14,8	159,1	217,3
25	115,9	16,1	169,9	14,8	159	217,9

No	LP ECONOMIZER							
	mfw.in	Pfw.in		Teg.in		Pfw.out	Tfw.out	Teg.out
26	115,6	16,2		170		14,8	159,1	217,8
27	115,8	16,2		170,4		14,8	158,9	217,2
28	120,4	16,2		169,8		14,8	158,7	217,7
29	118,8	16,3		170,4		14,9	159	217,5
30	114,4	16,2		170		14,8	159,3	217,7
31	116,6	16,1		170,3		14,8	158,6	217,7
32	115,4	16,1		170,5		14,8	158,8	217,8
33	116	16,2		170,1		14,8	159,1	217,7
34	115,3	16,2		169,8		14,8	158,7	217,5
35	114,4	16,2		170,4		14,8	159,1	217,5
36	114,1	16,2		170,4		14,8	158,9	217,5
37	114,9	16,2		170		14,8	158,7	217,9
38	119	16,2		170		14,7	159,1	217,1
39	118	16,2		170,1		14,8	158,9	217,4
40	117	16,3		170		14,9	159	217,4
41	113,4	16,3		170,3		15	158,9	217,9
42	121,7	16,2		170,4		14,8	158,3	220,6
43	118	16,1		170,9		14,7	158,6	221,3
44	118,7	16,2		170,7		14,7	158,6	221,8
45	120,6	16,2		170,1		14,8	158,5	221,9
46	119,8	16,1		170,4		14,7	158,7	221,9
47	121,6	16,1		170,4		14,7	159,1	222
48	119,3	16,2		170,5		14,8	158,5	219,1
49	117,3	16,2		170,4		14,8	158,7	218,7
50	161,7	16,3		170,7		15	159,1	218,8

No	LPEVAPORATOR					
		Tfw.in	Teg.in			Teg.out
1		160,6	221,7			268,3
2		158,1	221,3			269,1
3		160,6	221,1			267,9
4		160,7	222,2			268,2
5		160,9	224,7			275,4
6		160,3	224,1			276,7
7		158,3	220,2			270,5
8		160,5	220,2			268,6
9		159,3	220,6			268,5
10		157,9	219			266,8
11		159	218,3			266,2
12		158,4	218,1			265,8
13		158,7	217,6			266
14		158,9	217,8			266,4
15		158,9	217,5			266,5
16		158,8	217,3			266,5
17		158,2	217,8			266,9
18		158,9	217,5			266,6
19		158,5	217,5			266,8
20		158,9	217,9			266,2
21		159,1	217,5			266
22		159,1	217,2			266,3
23		159	217,3			266,2
24		159,1	217,3			266,3
25		159	217,9			266,7

No	LP EVAPORATOR					
		Tfw.in	Teg.in			Teg.out
26		159,1	217,8			267
27		158,9	217,2			266
28		158,7	217,7			267
29		159	217,5			266,4
30		159,3	217,7			267
31		158,6	217,7			266,8
32		158,8	217,8			266,9
33		159,1	217,7			266,7
34		158,7	217,5			266,3
35		159,1	217,5			266,9
36		158,9	217,5			266,9
37		158,7	217,9			267,1
38		159,1	217,1			266,7
39		158,9	217,4			267,2
40		159	217,4			267,4
41		158,9	217,9			259,7
42		158,3	220,6			256,2
43		158,6	221,3			255,8
44		158,6	221,8			255,8
45		158,5	221,9			255,9
46		158,7	221,9			255,8
47		159,1	222			258,5
48		158,5	219,1			263,1
49		158,7	218,7			265,7
50		159,1	218,8			266,9



No	HP ECONOMIZER					
	Pfw.in				Tfw.out	Teg.out
1	164,8				268,3	424,3
2	164,5				269,1	422,4
3	164,2				267,9	424,2
4	165,7				268,2	422,8
5	166,2				275,4	430,9
6	166,1				276,7	430,1
7	164,2				270,5	425,8
8	164,3				268,6	427,7
9	164,1				268,5	427,4
10	162,5				266,8	432,6
11	162,4				266,2	438,6
12	161,7				265,8	439,1
13	162,2				266	440,3
14	161,9				266,4	440,3
15	162,1				266,5	440,7
16	162,1				266,5	440,6
17	161,4				266,9	440,4
18	162				266,6	440,5
19	161,7				266,8	440,5
20	162,3				266,2	439,8
21	162				266	440,1
22	161,7				266,3	440,1
23	162,1				266,2	440,2
24	161,7				266,3	440,7
25	161,6				266,7	441

No	HP ECONOMIZER					
	Pfw.in				Tfw.out	Teg.out
26	162,1				267	440,6
27	161,7				266	440,1
28	162,1				267	441
29	162				266,4	440,4
30	162,1				267	441
31	161,6				266,8	441,3
32	162,1				266,9	441,3
33	161,5				266,7	441,3
34	161,5				266,3	440,6
35	161,5				266,9	441,6
36	162,1				266,9	441,5
37	161,7				267,1	441
38	161,9				266,7	441,7
39	161,8				267,2	441,5
40	161,9				267,4	441,4
41	163,5				259,7	411
42	164,6				256,2	407,5
43	164,3				255,8	405,7
44	164,1				255,8	404,7
45	164,7				255,9	404,8
46	164,7				255,8	405,1
47	164				258,5	428
48	162,3				263,1	435,1
49	162				265,7	437,8
50	162,8				266,9	436,5

No	HP EVAPORATOR					
	Pfw.in		Teg.in		Tfw.out	Teg.out
1	45,11		424,3		448	482,9
2	43,58		422,4		449	484,9
3	43,39		424,2		452	486,2
4	45,6		422,8		445	479,7
5	48,98		430,9		451	488,4
6	48,9		430,1		448	486,9
7	43,64		425,8		453	489,6
8	43,86		427,7		456	491,8
9	43,92		427,4		455	491,6
10	42,69		432,6		467	505,1
11	42,99		438,6		473	512,5
12	43,13		439,1		473	513,9
13	43,31		440,3		474	515,8
14	43,42		440,3		474	516,1
15	43,39		440,7		475	516,5
16	43,37		440,6		474	516,3
17	43,34		440,4		474	515,1
18	43,33		440,5		474	515,9
19	43,35		440,5		475	515,8
20	43,28		439,8		474	515,1
21	43,27		440,1		474	515,6
22	43,3		440,1		473	515,7
23	43,28		440,2		474	515,4
24	43,39		440,7		475	516,7
25	43,32		441		475	516

No	HP EVAPORATOR				
	Pfw.in	Teg.in		Tfw.out	Teg.out
26	43,4	440,6		474	516,1
27	43,34	440,1		474	516
28	43,38	441		475	515,8
29	43,42	440,4		475	516,4
30	43,37	441		475	516,6
31	43,37	441,3		475	517,1
32	43,44	441,3		475	517,1
33	43,4	441,3		475	516,8
34	43,49	440,6		475	516,5
35	43,49	441,6		475	517,4
36	43,44	441,5		475	517,1
37	43,5	441		475	516,8
38	43,51	441,7		476	517,6
39	43,53	441,5		475	517,5
40	43,53	441,4		475	516,9
41	36,39	411		440	472,6
42	36,73	407,5		439	465,6
43	36,65	405,7		437	464,1
44	36,64	404,7		437	462,5
45	36,64	404,8		437	462,7
46	36,64	405,1		437	462,5
47	39,74	428		466	498,2
48	42,24	435,1		471	508,2
49	42,74	437,8		471	510,5
50	44,91	436,5		464	502,9

No	SUPERHEATER						
		Tfw.in	Teg.in	mfw.out	Pfw.out	Tfw.out	
1		448	482,9	154	42,3	450	
2		449	484,9	150	40,8	450	
3		452	486,2	149	40,7	452	
4		445	479,7	156	42,8	447	
5		451	488,4	165	46	451	
6		448	486,9	167	45,9	450	
7		453	489,6	149	40,9	454	
8		456	491,8	149	41,2	456	
9		455	491,6	150	41,2	456	
10		467	505,1	145	40	468	
11		473	512,5	145	40,3	475	
12		473	513,9	145	40,5	475	
13		474	515,8	146	40,6	475	
14		474	516,1	146	40,7	476	
15		475	516,5	146	40,7	477	
16		474	516,3	147	40,6	476	
17		474	515,1	146	40,6	475	
18		474	515,9	146	40,6	476	
19		475	515,8	146	40,6	476	
20		474	515,1	146	40,5	476	
21		474	515,6	147	40,5	476	
22		473	515,7	147	40,6	475	
23		474	515,4	146	40,5	475	
24		475	516,7	146	40,7	477	
25		475	516	146	40,6	476	

No	SUPERHEATER						
		Tfw.in	Teg.in	mfw.out	Pfw.out	Tfw.out	
26		474	516,1	147	40,7	476	
27		474	516	146	40,6	475	
28		475	515,8	146	40,7	476	
29		475	516,4	146	40,7	476	
30		475	516,6	147	40,7	476	
31		475	517,1	146	40,7	477	
32		475	517,1	147	40,7	476	
33		475	516,8	146	40,7	476	
34		475	516,5	147	40,7	477	
35		475	517,4	146	40,7	477	
36		475	517,1	146	40,7	476	
37		475	516,8	147	40,8	477	
38		476	517,6	147	40,8	476	
39		475	517,5	147	40,8	477	
40		475	516,9	147	40,8	477	
41		440	472,6	129	34	441	
42		439	465,6	125	34,6	440	
43		437	464,1	124	34,5	439	
44		437	462,5	124	34,5	438	
45		437	462,7	126	34,5	438	
46		437	462,5	125	34,6	438	
47		466	498,2	139	37,1	468	
48		471	508,2	144	39,6	472	
49		471	510,5	144	40,1	473	
50		464	502,9	152	42,2	466	

## BIODATA PENULIS



Penulis yang bernama Furoidah Chilmi dilahirkan di Jombang, 15 Desember 1997 dari ayah bernama Imam Syafii dan ibu bernama Ainun Jariyah. Saat ini penulis tinggal Wedoro Belahan Gg 8 Wedoro Waru Sidoarjo. Penulis telah menyelesaikan Pendidikan dasar di MINU Wedoro, pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Waru, pendidikan di menengah akhir di MBI Amanatul

Ummah Pacet Mojokerto, dan saat ini sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga sekarang.

Pada bulan Juli 2019, penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **ANALISA KINERJA *HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR* PADA PLTGU PJB GRESIK MELALUI SIMULASI BERBASIS JARINGAN SYARAF TIRUAN**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran, maupun ingun berdiskusi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini, maka dapat menghubungi penulis melalui email : [fchilmi5@gmail.com](mailto:fchilmi5@gmail.com).