



**LAPORAN TESIS**

**TESIS- TF185471**

**OPTIMISASI KONSUMSI BAHAN BAKAR PADA GAS  
*TURBINE GENERATOR* BERBASIS *ARTIFICIAL  
INTELLIGENCE* UNTUK PENINGKATAN  
PERFORMANSI KONTROL MULTI VARIABEL**

**RISMA YUDHANTO  
NRP. 02311850017002**

**DOSEN PEMBIMBING  
Totok Ruki Biyanto, ST., MT., Ph.D.**

**PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA INSTRUMENTASI INDUSTRI  
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2020**



## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

**Magister Teknik (MT)**

di

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**RISMA YUDHANTO**

**NRP: 02311850017002**

Tanggal Ujian : 13 Juli 2020

Periode Wisuda : September 2020

Disetujui oleh :

**Pembimbing**

1. Totok R. Biyanto ST., MT., Ph.D.  
NIP: 197107021998021001

.....

**Penguji**

2. Gunawan Nugroho ST., MT., Ph.D.  
NIP: 19771127 200212 1 002
3. Dr. Bambang L. Widjantoro ST., MT.  
NIP: 196905071995121001

.....

.....



Kapala Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

**Suyanto, S.T., M.T.**  
NIP: 197111131995121002

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **OPTIMISASI KONSUMSI BAHAN BAKAR PADA *GAS TURBINE GENERATOR* BERBASIS *ARTIFICIAL INTELLIGENCE* UNTUK PENINGKATAN PERFORMANSI KONTROL MULTI VARIABEL**

Nama Mahasiswa : Risma Yudhanto  
NRP : 02311850017002  
Pembimbing : Totok R. Biyanto ST., MT., Ph.D.

## **ABSTRAK**

Sistem Turbin Gas adalah sebuah mesin berputar yang mengambil energi dari aliran gas hasil pembakaran. Keandalan dan efisiensi turbin gas menjadi salah satu prioritas utama di Saka Indonesia Pangkah Ltd. Untuk mengoptimisasi operating condition turbin gas diperlukan tiga komponen. Pertama adalah problem formulasi yang terdiri dari fungsi tujuan, batasan masalah dan penentuan variable yang dioptimisasi. Kedua adalah model yang valid, yang mewakili karakteristik turbin gas yang terpasang di SIPL. Ketiga adalah teknik optimisasi yang sesuai dengan masalah optimisasi yang akan dipecahkan. Fungsi objektif GAO yang digunakan pada tesis ini adalah meningkatkan efisiensi generator dengan membuat batasan operasional sebagai konstrain dengan teknik manipulasi Air to Fuel Ratio. Pemodelan dikembangkan dengan menggunakan *Artificial Neural Network (ANN)* dan *Genetic Algorithm (GA)* dipilih sebagai teknik optimisasi stokastik untuk menyelesaikan masalah. Pemodelan ANN dibuat berdasarkan data operasi yang disusun dari parameter aktual pada gas turbine generator. Data yang diperlukan untuk pemodelan berbasis ANN sekitar 8150 set data yang akan digunakan untuk melatih dan memvalidasi model ANN. Data set variabel tersebut dibagi dua untuk keperluan validasi sebesar 87.5% dan untuk validasi sebanyak 12.5%. Pangaturan bobot bagi jaringan syaraf tiruan dilakukan menggunakan algoritma Levenberg-Marquardt yang mampu memberikan hasil dengan RMSE cukup baik, yakni  $7.3 \times 10^{-3}$ . Dari hasil simulasi optimisasi stokastik (GA) didapatkan potensi penurunan pemakaian Fuel sekitar 280.8 kg/h apabila air mass flow bisa ditingkatkan dari 2.4 kg/s menjadi 2.7 kg/s, efisiensi bisa ditingkatkan hingga 10.6%.

**Kata kunci :** *Fuel Optimization, Gas Turbine Generator, ANN, GA*



# **FUEL CONSUMPTION OPTIMIZATION OF GAS TURBINE GENERATOR BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR MULTIVARIABLE CONTROL PERFORMANCE IMPROVEMENT**

Student Name : Risma Yudhanto  
NRP : 02311850017002  
Supervisor : Totok R. Biyanto ST., MT., Ph.D.

## ***ABSTRACT***

*Abstract – A Gas Turbine is a rotary engine that extracts energy from a flow combustion gas. The reliability and efficiency of gas turbines is one of the top priorities at Saka Indonesia Pangkah Ltd (SIPL). In order to optimize the operating conditions of a gas turbine, three components are needed. First is the problem formulation which consists of objective functions, problem boundaries or constraints and determination of optimized variables. Second component is a valid model, which represents the characteristics of a gas turbine installed in SIPL. Third component is the optimization technique that is suitable with the optimization problem that will be solved. In this thesis, the objective function is maximizing gas turbine efficiency, some operational limitation as constraints by manipulating air to fuel ratio. The model was developed using Artificial Neural Network (ANN) and Genetic Algorithm (GA) was selected as the stochastic optimization technique to solve the problem. The neural network model created directly using the operational data from an actual parameter gas turbine generator. The data needed for ANN-based modeling is around 8150 data sets that will be used to train and validate the ANN model. Variable data sets were divided in two parts, for training purposes is 87.5% and for validation is 12.5%. Weight management for neural networks was carried out using Levenberg-Marquardt algorithm which could give good results with  $RMSE = 7.3 \times 10^{-3}$ . From the results of the stochastic optimization (GA) simulation, the potential reduction of fuel gas consumption is around 280.8 kg/hr if the air mass flow can be increased from 2.4 kg/s to 2.7 kg/s, efficiency increase up to 10.6%.*

**Key words :** Fuel Optimization, Gas Turbine Generator, ANN, GA

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah S.W.T, karena rahmat-Nya hingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, kelancaran dalam menyusun laporan tesis yang berjudul “ Perancangan Algoritma Kontrol pada Sistem Monitoring dan Kontrol Jembatan Berbasis *Internet of Things (IoT)* secara Real Time”. Pada kesempatan ini, penulis hendak mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Suyanto,S.T.,M.T. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
2. Bapak Totok R. Biyanto ST., MT., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan banyak ilmu dan membantu dalam proses pengerjaan tesis.
3. Segenap Bapak/ibu dosen, khususnya pengampu bidang minat rekayasa instrumentasi di Departemen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan banyak ilmu penulis selama diperkuliahkan.
4. Orang tua dan keluarga penulis yang senantiasa memberikan doa, bantuan dan motivasi.
5. Rekan-rekan kerja PT. SAKA Indonesia Pangkah Ltd dan Pascasarjana Teknik Fisika ITS angkatan 2018 yang saling memberikan semangat, doa serta selalu menghibur.
6. Sahabat-sahabat penulis yang telah mendoakan untuk kelancaran tesis dan pihak lain yang telah membantu penulis menyelesaikan tesis ini.

Penulis mengucapkan mohon maaf atas ketidaksempurnaan dalam penulisan laporan tesis ini. Semoga laporan tesis ini bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, 01 Agustus 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN TESIS .....	iii
ABSTRAK .....	v
<i>ABSTRACT</i> .....	vi
KATA PENGANTAR .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
BAB 2 DASAR TEORI .....	5
2.1 Gas Turbin dan Komponennya .....	5
2.2 Siklus Gas Turbin .....	8
2.3 Air Fuel Ratio, Spesific Fuel Consumption, dan Efisiensi .....	13
2.3.1 Air Fuel Ratio .....	13
2.3.2 Spesific Fuel Consumption .....	14
2.3.3 Efisiensi .....	14
2.4 Pendekatan Konstruksi Model Turbin Gas .....	15
2.4.1 White-Box Models .....	16
2.4.2 Black-Box Models .....	17
2.4.3 Gray-Box Models .....	17
2.5 Jaringan Syaraf Tiruan .....	18
2.6 Metode Pelatihan <i>Levenberg-Marquardt</i> (TRAINLM) .....	20
2.7 <i>Root Mean Squared Error (RMSE)</i> .....	23
2.8 Aplikasi Jaringan Syaraf Tiruan pada Matlab .....	23
2.9 Genetic Algorithm .....	24



BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....	28
3.1 Pengambilan Data Parameter <i>Gas Turbine Generator</i> .....	29
3.2 Identifikasi Parameter pada Gas Turbine Generator .....	32
3.3 Penentuan Objective Function dan variabel yang dioptimasi .....	32
3.4 Pemodelan Jaringan Syaraf Tiruan .....	33
3.5 Validasi Model JST .....	36
3.6 Optimasi Efisiensi Generator Menggunakan Genetic Algorithm .....	36
3.7 Analisa Data dan Penyusunan Laporan .....	40
BAB 4 ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....	41
4.1 Pemilihan Variabel dan Perhitungan Performansi Turbin Gas .....	41
4.2 Perhitungan Sebelum dilakukan Optimasi .....	44
4.2.1 Properties untuk setiap <i>state</i> .....	45
4.2.2 Perhitungan Performa Turbin Gas .....	49
4.3 Pemodelan dan Validasi Jaringan Syaraf Tiruan .....	51
4.4 Optimasi turbin generator dengan menggunakan Algoritma Genetik ....	56
4.5 Perhitungan setelah dilakukan Optimasi .....	58
4.5.1 Properties untuk setiap <i>state</i> .....	58
4.5.2 Perhitungan Performa Turbin Gas .....	62
BAB V .....	65
5.1 Kesimpulan .....	65
5.2 Saran .....	65
DAFTAR PUSTAKA .....	66

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Turbin Gas berporos tunggal.....	7
Gambar 2. 2 Turbin Gas berporos Ganda .....	7
Gambar 2. 3 P-V dan T-S Diagram Siklus Ericson .....	8
Gambar 2. 4 P-V dan T-S Diagram Siklus Stirling .....	9
Gambar 2. 5 P-V dan T-S Diagram Siklus Brayton .....	10
Gambar 2. 6 Grafik hubungan efisiensi pembakaran dengan kebutuhan udara berlebih (excess air)[6] .....	14
Gambar 2. 7 Komponen utama Turbin Gas .....	16
Gambar 2. 9 Jaringan syaraf tiruan dengan struktur MLP .....	19
Gambar 2. 10 Blok diagram model turbin gas aero berbasis-ANN untuk meminimalkan bahan bakar dengan mempertahankan thrust [18].....	20
Gambar 2. 11 Ilustrasi Proses crossover .....	25
Gambar 2. 12 Ilustrasi Proses Mutation.....	26
Gambar 2. 13 Diagram alir GA .....	27
 Gambar 3. 1 Bagan Alur Penelitian.....	 28
Gambar 3. 2 PFD Gas Turbine Generator.....	32
Gambar 3. 3 Arsitektur JST yang digunakan pada penelitian Tesis.....	34
Gambar 3. 4 Bagan alur pembuatan program JST.....	35
Gambar 3. 5 Grafik Data RMSE .....	36
Gambar 3. 6 Fungsi aktivasi Tangen Sigmoid .....	38
 Gambar 4. 1 Arsitektur JST yang digunakan untuk memodelkan sistem.....	 52
Gambar 4. 2 Grafik data RMSE dan respon terhadap generator capacity .....	52
Gambar 4. 3 Grafik nilai RMSE pemodelan gas turbin generator dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan.....	53
Gambar 4. 4 Grafik Data Training NN Generator Capacity – Power kW .....	53
Gambar 4. 5 Grafik Data Validasi NN Generator Capacity – Power kW .....	54
Gambar 4. 6 Grafik Data Training NN Generator Percent Efficiency .....	54
Gambar 4. 7 Grafik Data Validasi NN Generator Percent Efficiency.....	54
Gambar 4. 8 Grafik Data Training NN T5 Average Temperature (° C) .....	55
Gambar 4. 9 Grafik Data Valisai NN T5 Average Temperature (° C) .....	55
Gambar 4. 10 Grafik optimasi penggunaan arus listrik .....	56
Gambar 4. 11 Perbandingan diagram P-V Gas Turbine Generator.....	64

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi Gas Turbine Generator .....	29
Tabel 3. 2 Kebutuhan Data Penelitian .....	29
Tabel 3. 3 Data parameter Input ANN untuk pemodelan GTG .....	30
Tabel 3. 4 Data parameter Output ANN untuk pemodelan GTG.....	31
Tabel 3. 5 Masukan dan keluaran JST .....	31
Tabel 4. 1 Data parameter Input ANN untuk pemodelan GTG .....	41
Tabel 4. 2 Data parameter Output ANN untuk pemodelan GTG .....	42
Tabel 4. 3 Data Komposisi, Presentase dan Specific Heat Bahan Bakar Gas.....	42
Tabel 4. 4 Data properties natural gas dan udara [22] .....	44
Tabel 4. 5 Data Operasi GTG-B .....	44
Tabel 4. 6 Tabel Data Training dan Validasi .....	55
Tabel 4. 7 Perbandingan hasil performansi sebelum dan setelah dilakukan optimasi.....	56
Tabel 4. 8 Data Operasi GTG-B .....	58

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Saka Indonesia Pangkah Limited memiliki 2 (dua) Operasi Kerja, yaitu Offshore dan Onshore. Masing-masing fasilitas membutuhkan energi untuk menjalankan prosesnya. Energi yang dibutuhkan berupa bahan bakar gas dan minyak yang kemudian akan dikonversikan menjadi listrik (generator), energi panas (heater), maupun mekanik (compressor). Pada Fasilitas Offshore terdapat 4 (empat) platform yang mendukung segala aktivitas pengangkatan minyak dan gas untuk disalurkan ke Onshore Operasi Kerja. Well Head Platform – Alpha (WHP-A) menggunakan bahan bakar minyak untuk 2 (dua) Diesel Generator A/B dan 1 (satu) Emergency Diesel Generator. Sementara Well Head Platform – Bravo (WHP-B) menggunakan energi listrik dari Gas Turbine Generator yang terdapat di Accomodation & Utility Platform (AUP). Energi listrik ini juga digunakan oleh Compression Processing Platform (CPP). Selain itu CPP juga menghasilkan energi mekanik melalui Gas Lift Compressor menggunakan energi dari bahan bakar gas untuk membantu mengangkat minyak dan gas pada WHP.

Kehandalan dan efisiensi Turbin Gas menjadi salah satu tujuan utama di Saka Indonesia Pangkah Ltd. Pemodelan dan simulasi pada Turbin Gas menjadi alat yang powerful untuk mengoptimalkan kinerja peralatan semacam ini. Kegiatan penelitian telah banyak dilakukan dalam bidang ini dan berbagai model analitik dan eksperimental telah dibangun sejauh ini untuk mendapatkan pemahaman mendalam tentang perilaku nonlinear dan dinamika kompleks dari sistem ini. Multivariate advance process control sebagai metode baru untuk optimasi merupakan alat yang cocok untuk pemrosesan data, pemodelan dan kontrol sistem yang tidak linear seperti Turbin Gas untuk meningkatkan kinerja sistem yang dinamis.

Turbin gas adalah mesin pembakaran internal yang menggunakan energi gas dari udara untuk mengubah energi kimia dari bahan bakar (*fuel*) menjadi energi mekanik yang dirancang untuk mengekstrak sebanyak mungkin energi dari bahan bakar [1]. Sebelum membuat model turbin gas, beberapa faktor dasar harus

dipertimbangkan dengan cermat. Tipe turbin gas, konfigurasi turbin gas, metode pemodelan, tipe dan konfigurasi sistem kontrol, dan tujuan pemodelan adalah salah satu kriteria paling penting pada awal proses pemodelan [2]. Survei literatur menunjukkan bahwa ada banyak sumber kegiatan penelitian di bidang pemodelan, simulasi dan kontrol turbin gas. Namun terlepas dari semua upaya yang telah dilakukan di bidang ini, perhatian khusus mengenai model dan kontrol perlu dilakukan, algoritma pengontrol proporsional-integral-derivatif (PID) mungkin sulit untuk ditangani dalam proses yang sangat nonlinear dan waktunya bervariasi [3].

Pembuatan model turbin gas dan sistem kontrol telah menjadi strategi teknis dan hemat biaya yang berguna untuk optimalisasi kinerja peralatan yang dapat digunakan untuk prediksi kinerja off-desain, penurunan kinerja, evaluasi emisi, penggunaan masa pakai turbin creep dan sistem kontrol mesin [4]

Secara umum optimasi berarti pencarian nilai terbaik (minimum atau maksimum) dari beberapa fungsi yang diberikan pada suatu konteks. Optimasi dapat diartikan usaha untuk meningkatkan kinerja, sehingga mampu dihasilkan kualitas yang baik dan hasil kerja yang tinggi. Pada penelitian ini, optimasi diartikan pemaksimalan nilai Efisiensi ( $\eta$ ) berhubungan dengan pemakaian bahan bakar. Semakin besar nilainya maka pemakaian bahan bakar lebih sedikit dan efisien. Asgari et al. memperkenalkan Artificial Neural Network (ANN) model untuk simulasi operasi single shaft gas turbine [2]. Pengembangan penelitian berbasis ANN untuk identifikasi sistem offline turbin gas berdasarkan kombinasi berbagai fungsi pelatihan, jumlah neuron dan fungsi transfer dengan menggunakan struktur multi-layer perceptron (MLP) diperlukan untuk peningkatan kinerja turbin gas. Pemodelan ANN dapat diterapkan secara andal untuk identifikasi sistem turbin gas dan dapat memprediksi parameter output Gas Turbine berdasarkan perubahan input sistem dengan akurasi tinggi.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah yang akan diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Variabel operasional di sistem turbin gas terutama data di sistem pembakaran yang akan dioptimasi dan batasan batasannya.
- b. Diperlukan model turbin gas yang mampu menangani multi variabel dan valid terhadap data lapangan yang nonlinear.
- c. Diperlukan struktur multivariate advanced process control pada Turbin Gas untuk efisiensi konsumsi bahan bakar.
- d. Perlu optimasi untuk menentukan setpoint yang sesuai pada advanced process control

### **1.3. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Perlu data prosesing berupa pemilihan data yang akan menjadi fungsi tujuan, memilih variabel operasional yang akan dioptimasi dan batasan-batasannya.
- b. Membangun model yang mampu menangani multi variabel dan valid terhadap data lapangan yang nonlinear.
- c. Mengembangkan struktur multivariate advanced process control pada Turbin Gas untuk efisiensi konsumsi bahan bakar
- d. Mengoptimasi setpoint yang sesuai pada advanced process control agar diperoleh plant yang hemat energi

### **1.4 Batasan Masalah**

Batasan masalah dalam penelitian ini diantaranya sebagai berikut:

- 1. *Plant* yang menjadi obyek studi adalah Turbin Gas Generator Centaur-40 PT. Saka Indonesia Pangkah Limited (SIPL)
- 2. Pengujian kebenaran algoritma menggunakan perangkat lunak *Matlab*
- 3. Hasil rancangan algoritma di tampilkan dalam bentuk simulasi.
- 4. Data *Gas Turbine Generator* berdasarkan data *real plant* di PT. Saka Indonesia Pangkah Limited (SIPL).

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB 2

### DASAR TEORI

#### 2.1 Gas Turbin dan Komponennya

Gas turbin adalah mesin penggerak yang dirancang untuk menggunakan gas hasil pembakaran sebagai penggerak sudu-sudunya. Berbeda dengan turbin uap (turbin dengan fluida penggeraknya adalah steam/uap air), material didalam gas turbin dirancang untuk dapat bertahan hingga suhu 1500 oC, karena turbin ini digerakkan oleh gas yang sebelumnya telah dipantik di ruang pembakaran. Secara umum proses yang terjadi pada sistem gas turbin adalah sebagai berikut:

1. Pemampatan (*compression*) udara di hisap dan dimampatkan
2. Pembakaran (*combustion*) bahan bakar dicampurkan ke dalam ruang bakar dengan udara kemudian di bakar.
3. Pemuaian (*expansion*) gas hasil pembakaran memuai dan mengalir ke luar melalui nozel (*nozzle*)
4. Pembuangan gas (*exhaust*) gas hasil pembakaran dikeluarkan lewat saluran pembuangan.

Pada kenyataannya, tidak ada proses yang selalu ideal tetap terjadi kerugian-kerugian yang dapat menyebabkan turunnya daya yang dihasilkan oleh gas turbin dan berakibat pada menurunnya performansi gas turbin itu sendiri. Kerugian-kerugian tersebut dapat terjadi pada ketiga komponen sistem gas turbin. Sebab-sebab terjadinya kerugian antara lain:

- Adanya gesekan fluida yang menyebabkan terjadinya kerugian tekanan (*pressure losses*) di ruang bakar.
- Adanya kerja yang berlebih waktu proses kompresi yang menyebabkan terjadinya gesekan antara bantalan turbin dengan angin.
- Berubahnya nilai Cp dari fluida kerja akibat terjadinya perubahan temperatur dan perubahan komposisi kimia dari fluida kerja.
- Adanya *mechanical loss*, dsb.

Untuk memperkecil kerugian ini hal yang dapat kita lakukan antara lain dengan perawatan (maintanance) yang teratur atau dengan memodifikasi peralatan yang ada.

Gas turbin dapat diklasifikasikan menjadi :

- A. Gas Turbin berdasarkan siklusnya
- B. Gas Turbin berdasarkan konstruksi porosnya
- C. Gas Turbin berdasarkan alirannya

**A. *Gas Turbin berdasarkan siklusnya***

*1. Siklus Terbuka (Open Cycle)*

Pada siklus terbuka gas turbin, terjadi proses pembakaran terhadap fluida kerja. Namun fluida kerja keluaran turbin langsung bersentuhan langsung dengan udara terbuka, tanpa ada pemanfaatan energi fluida untuk keperluan lain.

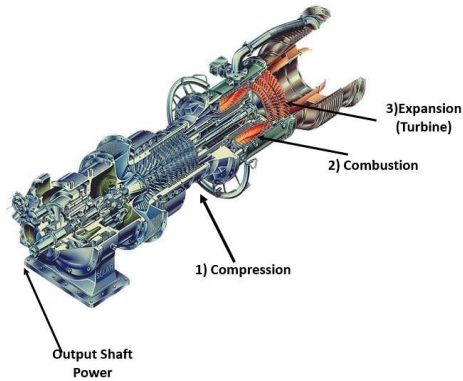
*2. Siklus Tertutup*

Pada siklus tertutup gas turbin, fluida kerja tidak mengalami proses pembakaran. Namun penambahan panas ke fluida kerja diperoleh melalui sumber eksternal yang lain, misalnya dikombinasikan pada pembangkit listrik tenaga nuklir. Selain itu fluida hasil pembuangan dimanfaatkan untuk keperluan lain dengan prinsip penukar kalor (heat exchanger). Setelah fluida mengalami penurunan suhu dan tekanan, fluida akan digunakan kembali dan masuk ke kompresor.

**B. *Gas Turbin berdasarkan Konstruksi Porosnya***

*1. Turbin Gas berporos tunggal (Single Shaft)*

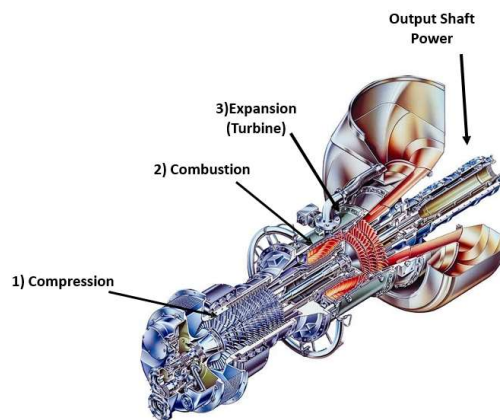
Turbin gas ini hanya memiliki satu poros saja, tetapi pada poros tersebut terdiri dari beberapa komponen utama turbin gas, seperti sudu turbin dan sudu kompresor. Jenis ini banyak digunakan untuk pembangkit listrik maupun industri, karena digunakan pada daya beban torsi yang konstan.



Gambar 2. 1 Turbin Gas berporos tunggal

2. *Turbin Gas berporos ganda (multi shaft)*

Turbin jenis ini merupakan turbin gas yang terdiri dari turbin bertekanan tinggi dan turbin bertekanan rendah, dimana turbin gas ini digunakan untuk menggerakkan beban yang berubah seperti kompresor pada unit. Turbin gas ini menggunakan poros ganda atau lebih dan biasanya digunakan untuk beban torsi yang tinggi ataupun bervariasi.



Gambar 2. 2 Turbin Gas berporos Ganda

**C. Gas Turbin berdasarkan Arah Alirannya**

1. *Gas Turbin Tipe Aksial*

Pada gas turbin tipe aksial, arah aliran fluida kerja sejajar dengan poros turbin. Turbin dengan tipe seperti ini digunakan pada pembangkit listrik pada umumnya.

2. *Gas Turbin Tipe Radial*

Pada gas turbin tipe radial, arah aliran fluida kerja tegak lurus terhadap poros turbin. Turbin dengan tipe seperti ini digunakan untuk memutar propeler pesawat.

## 2.2 Siklus Gas Turbin

Terdapat beberapa siklus gas turbin, diantaranya adalah :

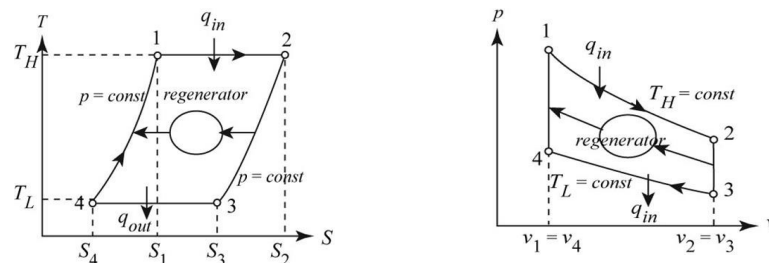
### 1. Siklus Ericson

Siklus Ericson merupakan siklus balik (*reversible cycle*) dari sebuah mesin kalor yang menggunakan sistem regenerator didalamnya. Regenerator merupakan suatu sistem penyimpanan energi, dimana nantinya energi yang disimpan tersebut akan kembali dialirkan ke fluida kerja.

Tahapan dari siklus Ericson adalah :

- 1-2 Ekspansi secara isothermal
- 2-3 Penambahan panas secara isobarik
- 3-4 Kompresi secara isothermal
- 4-1 Pelepasan panas secara isobarik

Gambar 1.3 menggambarkan Diagram P-V dan T-S Siklus Ericson.



Gambar 2. 3 P-V dan T-S Diagram Siklus Ericson

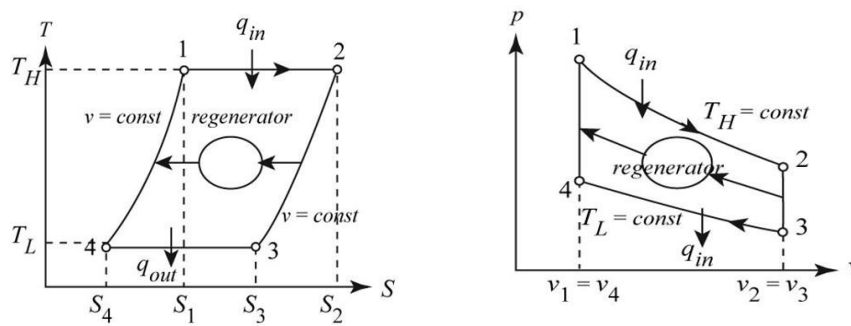
### 2. Siklus Stirling

Siklus Stirling merupakan siklus balik (*reversible cycle*) dari sebuah mesin kalor yang menggunakan sistem regenerator didalamnya. Tahapan dari siklus Stirling adalah :

- 1-2 Ekspansi secara isothermal

- 2-3 Penambahan panas secara isovolume
- 3-4 Kompresi secara isothermal
- 4-1 Pelepasan panas secara isovolume

Gambar 4.7 menggambarkan Diagram P-V dan T-S Siklus Stirling.



Gambar 2. 4 P-V dan T-S Diagram Siklus Stirling

### 3. Siklus Brayton

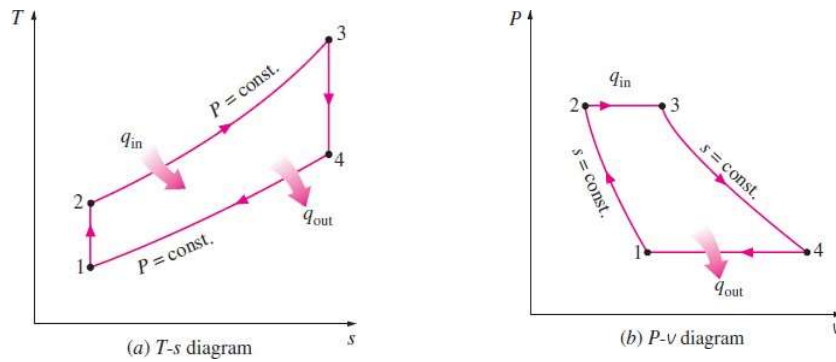
Siklus Brayton merupakan siklus yang paling ideal untuk sistem gas turbin (mesin resiprokasi). Hal ini disebabkan oleh :

- ✓ Siklus Stirling dan Brayton sangat sulit diaplikasikan karena membutuhkan luas permukaan area perpindahan panas yang tak terbatas.
- ✓ Membutuhkan waktu yang sangat lama dalam merealisasikan proses yang terjadi didalam sistem.

Tahapan proses pada siklus Brayton diantaranya adalah :

- 1-2 Kompresi secara isentropis
- 2-3 Penambahan panas secara isobarik
- 3-4 Ekspansi secara isentropis
- 4-1 Pelepasan panas secara isobarik

Gambar 4.8 menggambarkan Diagram P-V dan T-S Siklus Brayton.



Gambar 2. 5 P-V dan T-S Diagram Siklus Brayton

- **Proses 1-2 (Kompresi secara Isentropik)**

Udara atmosfer masuk kedalam inlet kompresor. Udara dikompresikan sampai tekanan tertentu dengan volume ruang yang menyempit. Pada proses ini, nilai entropi secara ideal seharusnya konstan, sehingga disebut proses isentropik. Proses ini ditunjukkan dengan garis kurva 1 ke 2 pada gambar diatas.

Berdasarkan proses isentropik, didapatkan formula:

$$\frac{P_1^{k-1}}{T_1^k} = \frac{P_2^{k-1}}{T_2^k} \quad (1)$$

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^k = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{k-1} \quad (2)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3)$$

( ref : Fundamental Engineering Thermodynamic E-book Michael J. Moran and Howard N. Shapiro hal 128 )

Kerja yang dibutuhkan kompresor,dalam hal ini adalah sebagai berikut :

$$W_{kompresor} = \dot{m}_{udara} ( h_2 - h_1 ) \quad (4)$$

- **Proses 2-3 (Penambahan Panas secara Isobarik)**

Pada tahap 2-3, udara terkompresi masuk ke ruang bakar. Bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar, dan diikuti dengan proses pembakaran bahan bakar tersebut. Energi panas hasil pembakaran diserap oleh udara ( $q_{in}$ ),

meningkatkan temperatur udara, dan menambah volume udara. Proses ini tidak mengalami kenaikan tekanan udara, karena udara hasil proses pembakaran bebas berekspansi ke sisi turbin. Karena tekanan yang konstan inilah maka proses ini disebut isobarik. Suatu bentuk sederhana dari persamaan tingkat keadaan gas ideal diperoleh apabila Cp konstan, dalam hal ini juga diketahui bahwa Cv juga konstan, maka diperoleh persamaan tingkat keadaan sebagai berikut:

$$PV = R \cdot T \quad (5)$$

$$u_2 = CV \cdot T_2 \quad (6)$$

$$h_2 = CV \cdot T_2 \quad (7)$$

( ref : V. Ganesan 1999, Gas Turbines hal. 10 )

Dengan mengasumsikan tidak ada *loss* pada perpindahan kalor dalam artian kalor terserap penuh dan pada *gas turbine* tidak ada energi yang dibangkitkan. Kesetimbangan massa dan energi pada kondisi *steady state* tunak volume atur sebagai berikut:

$$0 = Q_{cv} + \dot{W} + \dot{m} \left[ h_{in} - h_{out} \frac{v_{in}^2 - v_{out}^2}{2} \right] + [g(Z_{in} - Z_{out})] \quad (8)$$

Dengan  $Q_{CV}$  merupakan masukan Q yang terdapat pada pembakaran yang dihasilkan oleh bahan bakar Q . yang dihasilkan bahan bakar didapat dari persamaan:

$$m_{fuel} = \frac{Q_{in}}{LHV_{fuel}} \quad (9)$$

Jadi, dari persamaan di atas dapat diperoleh:

$$Q_{in} = \dot{m}_{bahan\ bakar} \times LHV_{bahan\ bakar} \quad (10)$$

- **Proses 3-4 (Ekspansi secara Isentropis)**

Udara bertekanan yang telah menyerap panas hasil pembakaran, berekspansi melewati turbin. Sudu-sudu turbin yang merupakan *nozzle-nozzle* kecil berfungsi untuk mengkonversikan energi panas udara menjadi energi kinetik. Sebagian energi



tersebut dikonversikan turbin untuk memutar kompresor. Pada sistem pembangkit listrik gas turbin, sebagian energi lagi dikonversikan turbin untuk memutar generator listrik. Sedangkan pada mesin turbojet, sebagian energi panas dikonversikan menjadi daya dorong pesawat oleh sebetuk *nozzle* besar pada ujung keluaran gas turbin.

$$\frac{P_3^{k-1}}{T_3} = \frac{P_4^{k-1}}{T_4} \quad (11)$$

$$\left(\frac{T_3}{T_4}\right)^k = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{k-1} \quad (12)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (13)$$

( ref : Fundamental Engineering Thermodynamic E-book Michael J. Moran and Howard N. Shapiro hal 407 )

Kerja yang dibutuhkan kompresor,dalam hal ini adalah sebagai berikut :

$$W_{turbin} = (\dot{m}_{udara} + \dot{m}_{bahan bakar}) (h_3 + h_4)$$

( ref : Fundamental Engineering Thermodynamic E-book Michael J. Moran and Howard N. Shapiro hal 492 ).

- **Proses 4-1 (Pelepasan Panas secara Isobarik)**

Tahap selanjutnya adalah pembuangan udara kembali ke atmosfer. Pada siklus Brayton ideal, udara yang keluar dari turbin ini masih menyisakan sejumlah energi panas. Panas ini diserap oleh udara bebas, sehingga secara siklus udara tersebut siap untuk kembali masuk ke tahap 1-2 lagi.

$$P_V = R \cdot T \quad (14)$$

$$u_2 = C_V \cdot T_4 \quad (15)$$

$$h_2 = C_V \cdot T_4 \quad (16)$$

( ref : V. Ganesan 1999, Gas Turbines hal. 10 )

Pembuangan kalor pada tekanan konstan (P = c). Kalor yang dilepas:

$$Q_{out} = (\dot{m}_{udara} + \dot{m}_{bahan bakar}) (h_4 - h_1) \quad (17)$$

## 2.3 Air Fuel Ratio, Spesific Fuel Consumption, dan Efisiensi

### 2.3.1 Air Fuel Ratio

Bahan bakar ( *natural gas* ) yang hendak dimasukkan kedalam ruang bakar haruslah dalam keadaan yang mudah terbakar, hal tersebut agar bisa didapatkan efisiensi gas turbin yang maksimal. Campuran bahan bakar yang belum sempurna akan sulit dibakar oleh percikan bunga api dari *spark plug*. Bahan bakar tidak dapat terbakar tanpa adanya udara ( $O_2$ ), tentunya dalam keadaan yang homogen. Bahan bakar atau natural gas yang dipakai dalam pembakaran sesuai dengan ketentuan atau aturan, sebab bahan bakar yang melimpah pada ruang bakar justru tidak meningkatkan tenaga yang dihasilkan gas turbin tersebut namun akan merugikan gas turbin sendiri. Perbandingan campuran udara dan bahan bakar sangat dipengaruhi oleh pemakaian bahan bakar. Perbandingan udara dan bahan bakar dinyatakan dalam bentuk volume atau berat dari bagian udara dan natural gas. *Air Fuel Ratio* adalah faktor yang mempengaruhi kesempurnaan proses pembakaran didalam ruang bakar. Merupakan komposisi campuran natural gas dan udara.

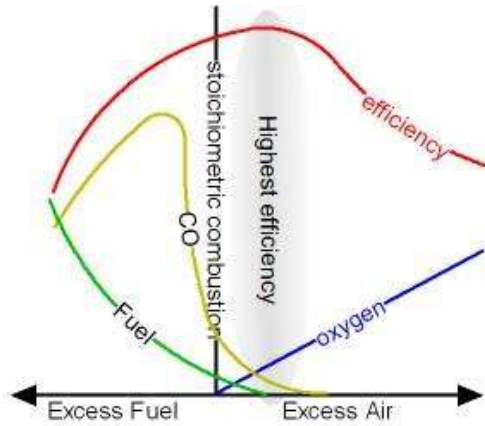
Misalkan AFR bernilai 14,7 artinya campuran terdiri dari 1 natural gas dan 14,7 udara biasa disebut *stoichiometry*. Air fuel ratio dapat dicari menggunakan persamaan :

$$\frac{A}{F} = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} \quad (18)$$

( ref : Fundamental Engineering Thermodynamic E-book Michael J. Moran and Howard N. Shapiro hal 637 )

Pada kenyataannya proses pembakaran sempurna ini tidak pernah terjadi. Untuk mengkondisikan agar proses pembakaran terjadi lebih sempurna, maka proses pembakaran dibuat dengan kondisi kelebihan udara. Jumlah udara berlebih yang dibutuhkan untuk proses pembakaran ini disebut dengan excess air [5]

Efisiensi pembakaran akan meningkat seiring dengan peningkatan jumlah excess air, hingga pada nilai tertentu, yaitu saat nilai kalor yang terbuang pada gas buang lebih besar dari pada kalor yang dapat disuplai oleh pembakaran yang optimal. Ilustrasi mengenai efisiensi pembakaran terhadap nilai excess air diperlihatkan pada Gambar 2.10 berikut ini [6] :



Gambar 2. 6 Grafik hubungan efisiensi pembakaran dengan kebutuhan udara berlebih (excess air)[6]

### 2.3.2 Spesific Fuel Consumption

Jumlah bahan bakar yang dikonsumsi (berat) untuk menghasilkan satu satuan daya dalam satu satuan waktu. Di mesin piston, SFC adalah sama dengan rasio massa bahan bakar/poros tenaga kuda. Dalam mesin gas turbin, SFC adalah sama dengan rasio massa bahan bakar/dorongan. Kondisi terbaik adalah ketika nilainya minimum. Nilai SFC menurun dengan tinggi saat dalam kondisi suhu dingin.

$$SFC = \frac{\dot{m}_{fuel}}{W_{nett}} \quad (19)$$

(ref: berbagienergi.com)

### 2.3.3 Efisiensi

#### 1. Efisiensi Kompresor

$$\eta_{kompresor} = \frac{\text{Actual compressor work output}}{\text{Isentropic compressor work output}} \quad (20)$$

$$\eta_{kompresor} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \times 100\% \quad (21)$$

( ref : Fundamental Engineering Thermodynamic E-book Michael J.

Moran and Howard N. Shapiro hal 412 )

## 2. Efisiensi Turbin

$$\eta_{turbine} = \frac{\text{Actual turbine work output}}{\text{Isentropic turbine work output}} \quad (22)$$

$$\eta_{turbine} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \times 100\% \quad (23)$$

( ref : Fundamental Engineering Thermodynamic E-book Michael J. Moran and Howard N. Shapiro hal 412 )

## 3. Efisiensi Siklus

$$\eta_{siklus} = \frac{W_{netto}}{Q_{in}} \times 100 \quad (24)$$

( ref : Fundamental Engineering Thermodynamic E-book Michael J. Moran and Howard N. Shapiro hal 414 )

## 4. Efisiensi Generator

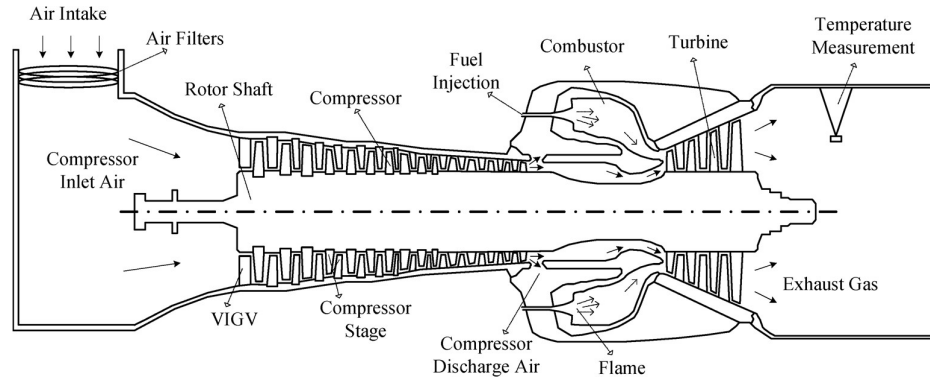
$$\eta_{generator} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{W}_{GT}} \times 100\% \quad (25)$$

### 2.4 Pendekatan Konstruksi Model Turbin Gas

Metodologi umum untuk sistem pemodelan menggunakan bahasa matematika untuk menggambarkan dan memprediksi perilaku suatu sistem. Kemajuan dan pengembangan bidang ilmiah dapat dikaitkan dengan kualitas model matematika dan kesesuaian dengan hasil pengukuran eksperimental. Pemodelan berbasis fisika adalah cabang utama pemodelan matematika. Ini menyiratkan bahwa sistem diatur oleh hukum fisika, yang mengarah ke fisik simulasi realistis. Pemodelan berbasis fisika menggunakan persamaan fisika matematika, ditambah dengan pengukuran sensor waktu nyata untuk mengatur model yang cocok untuk penggunaan operasional. Model matematis dapat diklasifikasikan sebagai "linear dan nonlinier", "deterministik dan stokastik (probabilistik)", Model "statis dan dinamis", atau "diskrit dan kontinyu" [7].

Ada banyak sumber mengenai pemodelan dan simulasi turbin gas dalam literatur. Berbagai macam model telah dibangun sejauh ini dari sudut pandang yang

berbeda dan untuk tujuan yang berbeda. Beberapa peneliti seperti Visser et al. [8] mencoba memperkenalkan model generik untuk turbin gas menggunakan software komersial, model yang disajikan dalam literatur didasarkan pada varietas metodologi dan pendekatan. Model sistem industri dapat diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama yaitu model *black-box* dan *white-box*.



Gambar 2. 7 Komponen utama Turbin Gas

#### 2.4.1 White-Box Models

Kemajuan yang signifikan telah terjadi dalam pemodelan turbin gas menggunakan metode *white-box*. Model matematika yang disederhanakan dari turbin gas yang cocok untuk digunakan dalam studi dan analisa sistem tenaga dinamis dari peralatan yang terhubung disajikan oleh Rowen [9]. Tujuan dari studinya adalah untuk menyelidiki stabilitas sistem tenaga dan memberikan perencanaan kontingensi pada gangguan sistem. Dia membahas berbagai masalah mengenai pemodelan termasuk operasi paralel dan terisolasi, sistem bahan bakar gas dan cairan serta governor *isochronous* dan *droop*. Model yang dihasilkan sangat berguna dalam studi yang berkaitan dengan dinamika sistem tenaga. Meskipun model Rowen telah menjadi basis bagi banyak peneliti untuk membangun varietas model turbin gas menggunakan pendekatan yang berbeda, model ini terbatas pada siklus sederhana dan turbin gas poros tunggal. Model matematika yang disederhanakan dari turbin gas poros tunggal juga ditunjukkan dalam menjalankan fungsinya sebagai penggerak mekanis [10]. Karakteristik dari kedua sistem bahan bakar dan kontrol dimasukkan dalam model sehingga penelitian Rowen

memungkinkan untuk mensimulasikan pada *heavy-duty single-shaft gas turbine*. Mereka menyarankan bahwa studi ini dapat berguna untuk tujuan pendidikan terutama bagi siswa dan pelatih yang tertarik pada dinamika turbin gas.

#### **2.4.2 Black-Box Models**

Model *Black-Box* digunakan ketika tidak ada atau sedikit informasi yang tersedia tentang formula fisika pada sistem tersebut [11]. Dalam hal ini, tujuannya adalah untuk mengungkapkan hubungan antara variabel sistem menggunakan input operasional yang diperoleh dan data keluaran dari kinerja sistem. Jaringan saraf tiruan (JST) adalah salah satu metode paling signifikan dalam pemodelan kotak hitam. JST adalah metode pertumbuhan cepat yang telah digunakan di berbagai industri selama beberapa tahun terakhir. Gagasan utama untuk menciptakan JST yang merupakan bagian dari kecerdasan buatan adalah untuk menyediakan model otak manusia yang sederhana untuk menyelesaikan masalah-masalah ilmiah dan industri yang kompleks di berbagai bidang.

Kemajuan yang signifikan telah dibuat dalam pemodelan turbin gas menggunakan jaringan saraf tiruan (JST/ANN). Sebagai contoh penelitian yang dapat dijadikan sebagai rujukan pada penyelidikan yang dilakukan oleh Lazzaretto dan Toffolo [12]. Mereka mempelajari desain turbin gas dan model off-desain dengan kesulitan yang dihadapi karena kurangnya pengetahuan tentang kinerja tahap demi tahap diatasi dengan membangun jaringan saraf tiruan (ANN). Perkiraan model NARMAX (*nonlinear auto-regressive moving average with exogeneous Input*) dari turbin gas pesawat disajikan oleh Chiras, Evans dan Reesa [13]. Mereka juga menerapkan algoritma estimasi orthogonal untuk memperkirakan model NARMAX untuk turbin gas pesawat. Dalam upaya lain, mereka memodelkan aliran bahan bakar yang berhubungan dengan kecepatan poros dari mesin turbin gas aero menggunakan feedforward neural network [14].

#### **2.4.3 Gray-Box Models**

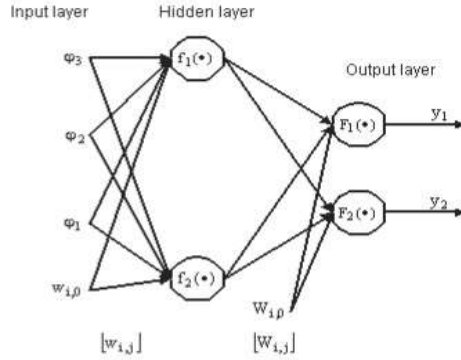
Selain metode white-box dan black-box, frase gray-box juga dapat digunakan ketika model empiris ditingkatkan dengan memanfaatkan tingkat wawasan tertentu yang tersedia tentang sistem. Dalam hal ini, percobaan dapat dikombinasikan dengan model matematika yang disusun untuk meningkatkan akurasi model [15].

## 2.5 Jaringan Syaraf Tiruan

Sistem Jaringan Syaraf Tiruan (JST/ANN) merupakan suatu sistem yang memodelkan cara kerja jaringan syaraf manusia sebagai suatu sistem dinamik nonlinier kontinyu yang diharapkan dapat meniru mekanisme otak dan menimbulkan perilaku cerdas. Jaringan ini terdiri dari banyak simpul (node) pemroses yang dianalogikan dengan neuron pada otak. Proses matematis yang ada dalam jaringan ini juga merupakan pendekatan pada cara kerja otak dan memiliki kemampuan belajar dari pengalaman. Pemilihan parameter yang tepat sebagai input dan output JST sangat penting untuk membuat model yang akurat dan handal. Ketersediaan data untuk parameter yang dipilih, pengetahuan sistem untuk identifikasi interkoneksi antara berbagai parameter dan tujuan untuk membuat model adalah faktor dasar dalam memilih input dan output yang sesuai.

Jaringan syaraf tiruan merupakan merupakan sebuah sistem pemrosesan informasi yang terbagi menjadi dua komponen fisik utama, yaitu elemen pemrosesan (*neuron*) dan koneksi antar elemen. Dalam lingkup yang lebih besar, jaringan syaraf tiruan dibangun oleh tiga prinsip dasar yaitu topologi, pembelajaran (*learning*) dan penarikan informasi (*recall*). Topologi adalah bagaimana setiap komponen dalam jaringan syaraf tiruan terorganisir kedalam lapisan-lapisan tertentu. Pembelajaran dalam jaringan syaraf tiruan adalah bagaimana suatu informasi diolah dan disimpan. Dan penarikan informasi adalah bagaimana suatu informasi yang telah tersimpan dapat ditarik dari jaringan. Topologi suatu jaringan syaraf tiruan memiliki peranan penting dalam menentukan penforma jaringan syaraf tiruan, karena suatu topologi jaringan syaraf tiruan yang memiliki lebih banyak koneksi antar setiap lapisannya memungkinkan jaringan syaraf tiruan tersebut menyelesaikan permasalahan nonlinear yang lebih kompleks. Topologi atau struktur jaringan yang umum digunakan adalah Multi Layer Perceptron (MLP). Berikut ini adalah gambar dari jaringan syaraf tiruan dengan struktur MLP.





Gambar 2. 8 Jaringan syaraf tiruan dengan struktur MLP

Representasi matematis dari gambar diatas adalah sebagai berikut,

$$y_i = F_i \sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} \cdot f_j \sum_{l=1}^{n_\phi} w_{l,j} + w_{j,0} + W_{i,0} \quad (26)$$

Dalam menentukan nilai bobot  $W$ , maka dibutuhkan data berupa keluaran  $\hat{y}$  dan masukan  $\phi$  yang cukup dan saling berkorelasi. Proses penentuan nilai bobotnya sendiri disebut dengan pelatihan (*training*) atau pembelajaran (*learning*). Tujuan dari pelatihan jaringan syaraf tiruan ini adalah untuk memperkecil kesalahan antara keluaran jaringan syaraf tiruan dan keluaran proses yang diidentifikasi  $y$  (sasaran/target).

Algoritma pelatihan yang digunakan dalam tesis kali ini adalah algoritma pelatihan Levenberg-Marquardt. Meskipun algoritma pelatihan ini lebih kompleks dibandingkan dengan algoritma back-propagation, namun algoritma ini mampu menghasilkan hasil yang lebih baik. Penurunan algoritma *Levenberg-Marquardt* dapat dilihat pada jurnal karangan Norgaard yang membahas tentang aplikasi jaringan syaraf tiruan dalam pemodelan dan pengendalian sistem dinamik [16].

Investigasi untuk penggunaan ANN untuk mengontrol sistem yang kompleks dan nonlinier dilakukan oleh Nabney dan Cressy [17]. Beberapa pengontrol ANN digunakan untuk mempertahankan tingkat dorongan (*thrust*) untuk turbin gas aero dan untuk mengontrol variabel sistem untuk mesin turbin gas pesawat poros ganda di wilayah operasional yang aman dan sesuai target yang diinginkan. Gagasan utama di balik penelitian ini adalah untuk meminimalkan konsumsi bahan bakar dan meningkatkan umur mesin. Mereka menggunakan arsitektur MLP dengan *single hidden layer* untuk melatih jaringan. Para peneliti menerapkan model

referensi sebagai input ke pengendali ANN. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja pengendali ANN yang diterapkan lebih baik daripada yang konvensional. Namun, mereka tidak dapat melacak model referensi sedekat yang mereka harapkan.

Upaya lain dilakukan oleh Dodd dan Martin [18], kurang lebih dengan tujuan yang sama. Teknik adaptif berbasis JST telah diusulkan untuk memodelkan dan mengendalikan mesin turbin gas aero dan mempertahankan daya dorong pada tingkat yang diinginkan sambil meminimalkan konsumsi bahan bakar di dalam mesin. Mereka menyarankan teknik yang akibatnya dapat memaksimalkan tenaga dorong untuk bahan bakar tertentu, menurunkan suhu kritis sudu turbin dan meningkatkan umur mesin. Dalam penelitian mereka, FFNN dengan fungsi aktivasi sigmoid digunakan untuk memodelkan sistem. Penyederhanaan dan pengelompokan jaringan saraf membantu para peneliti untuk menghitung perubahan yang diperlukan untuk parameter mesin yang dapat dikendalikan dan akibatnya untuk mempertahankan tingkat dorongan di titik yang ditargetkan. Gambar 11 menunjukkan diagram blok dari model ANN. Input sesuai dengan *fuel rate*, *area nozzle*, dan sudut *inlet guide vane*. Satu-satunya output adalah *thrust* [18].



Gambar 2. 9 Blok diagram model turbin gas aero berbasis-ANN untuk meminimalkan bahan bakar dengan mempertahankan thrust [18]

## 2.6 Metode Pelatihan *Levenberg-Marquardt* (TRAINLM)

Algoritma pembelajaran yang digunakan dalam penelitian ini adalah algoritma Levenberg Marquardt. Algoritma *Levenberg-Marquardt* merupakan salah satu jenis dari algoritma pelatihan *Artificial Neural Network Backpropagation* dengan dua jenis perhitungan, yaitu perhitungan maju dan perhitungan mundur. Langkah dasar algoritma *Levenberg-Marquardt* adalah penentuan matriks Hessian untuk mencari bobot-bobot dan bias koneksi yang digunakan. Matriks Hessian merupakan turunan kedua dari fungsi kinerja terhadap masing-masing komponen bobot dan

bias. Untuk memudahkan proses komputasi, matriks Hessian diubah dengan pendekatan secara iteratif pada masing-masing *epoch* selama algoritma pelatihan berjalan. Proses-proses perubahannya dilakukan dengan menggunakan fungsi gradien. Jika fungsi kerja yang digunakan berbentuk kuadrat error. Secara singkat perhitungan *Levenberg-Marquardt* dapat dijelaskan [16] sebagai berikut.

Langkah 0 :

- a. Inisialisasi bobot awal dengan bilangan acak kecil
- b. Inisialisasi *epoch* 0,  $MSE \neq 0$
- c. Tetapkan maksimm *epoch* parameter *Levenberg-Marquardt* ( $\eta > 0$ ), faktor  $\tau$  dan targer *error*

Langkah 1 :

Jika kondisi penghentian belum terpenuhi (*epoch* , maksimum atau MSE . target *error*), lakkan langkah berikutnya.

Langkah 2:

$$Epoch = epoch + 1$$

Untuk setiap pasangan data pelatihan lakukan langkah berikutnya.

Langkah 3

Unit *output* Ymenerima target pola yang berhubungan dengan pola *input* pelatihan. Jika diberikan N pasangan *input* data pelatihan

$$(x_r, t_r), r=1, 2, \dots, N \quad (27)$$

Dimana :

$$x_r = \text{Input}$$

$t_r$  = Target yang akan dicapai.

Kesalahan pada suatu data pelatihan ke-r didefinisikan sebagai

$$e_r = t_r - y_r \quad (28)$$

Dimana :

$e_r$  = Kesalahan pada unit *output*

$t_r$  = Keluaran yang diinginkan atau target

$y_r$  = Keluaran aktual

$e$  adalah vektor kesalahan berukuran  $N \times 1$  yang tersusun dari  $e_r, r=1,2,\dots, N$ .  $e$  dapat dituliskan sebagai berikut:

$$e = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_N]^T \quad (29)$$

Misal bobot dari bias koneksi dinyatakan dalam vektor  $w$ ,  $w$  merupakan vektor berukuran  $((2+1)p+1) \times 1$  dapat dituliskan sebagai:

$$w = [w_j \ b_2 \ v_{ij} \ b_1]^T \quad (30)$$

Kesalahan suatu pelatihan jaringan oleh vektor bobot dan bias koneksi  $w$  pada suatu data pelatihan ke- $r$  menjadi:

$$e_r(w) = (t_r - y_r) = (t_r - f(x_r, w)) \quad (31)$$

Vektor kesalahan oleh vektor bobot dan bias koneksi  $w$  menjadi  $e(w)$  berukuran  $N \times 1$  yang tersusun dari  $e_r(w)$  dengan  $r=1,2,\dots, N$ . Hitung fungsi jumlah kuadrat *error* dengan persamaan

$$E(w) = \frac{1}{2} e^T(w) e(w) \quad (32)$$

Hitung matriks Jacobian untuk vektor bobot dan bias koneksi:

$$J(w) = \left[ \frac{\partial e_r}{\partial w} \right]_{N \times ((2+n)p+1)} \quad (33)$$

Untuk  $r=1,2,3,\dots, N$

- a. Hitung matriks Hessian untuk vektor bobot dan bias dengan persamaan:

$$H(w) = [J^T(w)J(w) + \eta I]_{((2+n)p+1) \times ((2+n)p+1)} \quad (34)$$

- b. Hitung perubahan vektor bobot dan bias dengan persamaan:

$$\Delta w = -[H(w)]^{-1} J^T(w) e(w)_{((2+n)p+1) \times ((2+n)p+1)} \quad (35)$$

- c. Hitung vektor bobot dan bias baru

$$\mathbf{w}(\mathbf{baru}) = \mathbf{w}(\mathbf{lama}) + \Delta \mathbf{w} \quad (36)$$

d. Hitung kesalahan yang terjadi oleh bobot dan bias koneksi yang baru

$$E(\mathbf{w}(\mathbf{baru})) = \frac{1}{2} \mathbf{e}(\mathbf{w}(\mathbf{baru}))^T \mathbf{e}(\mathbf{w}(\mathbf{baru})) \quad (37)$$

e. Bandingkan  $E(\mathbf{w})$  dengan  $E(\mathbf{w}(\mathbf{baru}))$

Jika  $E(\mathbf{w}) \leq E(\mathbf{w}(\mathbf{baru}))$  maka didapatkan  $\eta = \eta * \tau$  dan kembali ke langkah a.

Jika  $E(\mathbf{w}) > E(\mathbf{w}(\mathbf{baru}))$  maka didapatkan  $\eta / \tau$   $\mathbf{w}(\mathbf{t}+1) = \mathbf{w}(\mathbf{t}) + \Delta \mathbf{w}$  kembali ke langkah

## 2.7 Root Mean Squared Error (RMSE)

*Root Mean Square Error* (RMSE) biasanya digunakan untuk mengetahui perbedaan antara nilai yang di prediksi oleh model dengan nilai aktual yang telah di observasi. RMSE menghitung rata-rata *error* berdasarkan pada nilai kuadrat *error*, dan tidak mengindikasikan arah nilai deviasi. RMSE lebih baik jika digunakan pada nilai *error* yang besar dibandingkan nilai *error* yang kecil, yang mana akan lebih baik jika *error* besar tersebut tidak diinginkan. RMSE juga lebih baik digunakan dalam peramalan konservatif. Berikut ini adalah rumus dari RMSE [19].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (38)$$

Dimana :

$y_i$  = Nilai aktual

$\hat{y}_i$  = Nilai prediksi

N = Jumlah Data

## 2.8 Aplikasi Jaringan Syaraf Tiruan pada Matlab

Aplikasi jaringan syaraf tiruan pada Matlab dikenal dengan nama *Neural Network Toolbox* (NNT). Toolbox ini menyediakan berbagai fungsi dan aplikasi untuk melakukan pemodelan sistem nonlinear yang sangat kompleks dengan menerapkan prinsip JST. NNT mempunyai fitur pelatihan dengan supervisi maupun tanpa supervisi. Perancangan dapat dilakukan dengan berbagai model JST, melaukan *training* dan mensimulasikan JST tersebut. Penggunaan NNT dapat

dilakukan untuk berbagai keperluan seperti pengenalan pola, pengelompokan data, prediksi dan pemodelan sistem dinamik [20].

## 2.9 Genetic Algorithm

*Genetic algorithm* (GA) atau algoritma genetika adalah salah satu algoritma komputasi yang berbasis evolusi, algoritma komputasi ini biasanya digunakan dalam memecahkan permasalahan optimasi. GA dikatakan berbasis evolusi karena dalam penyelesaian masalahnya, GA melihat kemampuan setiap individu yang mampu bermutasi atau menghasilkan individu baru dalam memperoleh hasil terbaik dari suatu masalah. Elemen-elemen yang terdapat dalam algoritma GA antara lain adalah populasi dari banyak kromosom, fungsi fitness, kawin silang dan mutasi. Kromosom pada GA merupakan nilai yang biasanya berupa deretan bilangan binari yang hanya terdiri dari 1 dan 0. Setiap kromosom tersebut nantinya akan membentuk sebuah individu. Dimana setiap individu memiliki nilai fungsi fitness hasil perhitungan yang akan menjadi indikator apakah individu tersebut “baik” atau “buruk”. Supaya kemungkinan dalam memperoleh individu yang optimal lebih besar, maka dilakukan kawin silang dan mutasi terhadap sebagian individu. Proses kawin silang sendiri biasanya hanya dilakukan pada individu yang dikategorikan “baik” atau memiliki nilai fungsi fitness mendekati optimal, dengan harapan bahwa generasi baru yang dihasilkan akan lebih baik lagi. Berbeda dengan kawin silang, mutasi dilakukan pada beberapa individu secara acak. Tujuan dari mutasi adalah untuk menciptakan individu baru, proses ini dilakukan supaya nilai optimal yang diperoleh tidak hanya berupa local optimum namun global optimum. Dalam algoritma GA, besar populasi pada umumnya dibatasi. Untuk menjaga besar populasi ini, perlu dilakukan eliminasi beberapa individu. Dalam prosesnya, kondisi yang menyatakan bahwa suatu individu layak dieliminasi cukup beragam. Namun kondisi yang paling umum adalah dengan melihat nilai fungsi fitness-nya, dimana individu dengan nilai fungsi fitness yang jauh dari nilai optimal yang dieliminasi. Selanjutnya populasi yang baru ini akan diuji ulang sesuai dengan fungsi fitness-nya, dilakukan kawin silang, mutasi dan eliminasi lagi dan terus hingga mencapai kondisi yang dianggap optimal atau telah mencapai batas generasi [21]. Dengan pencarian yang efektif dan efisien, (GA) dapat digunakan untuk memecahkan permasalahan dengan satu atau banyak variabel. Pada *genetic*

*algorithm* dikenal adanya proses inisiasi yang terdiri dari proses *selection*, *crossover*, and *mutation* [19]. Terdapat hal – hal yang harus dilakukan dalam algoritma genetika adalah :

1. Mendefinisikan individu, dimana individu menyatakan salah satu solusi (penyelesaian) yang mungkin dari penyelesaian yang diangkat.
2. Mendefinisikan nilai fitness, yang merupakan ukuran baik tidaknya sebuah individu atau baik tidaknya solusi yang didapatkan.
3. Menentukan proses pembangkitan populasi awal, hal ini biasanya dilakukan dengan menggunakan pembangkitan acak seperti *random-walk*.
4. Menentukan proses seleksi yang akan digunakan, dengan menggunakan mesin *roulette*, yang merupakan metode yang paling sederhana dan sering dikenal dengan nama *stochastic.sampling with replacement*.
5. Menentukan proses perkawinan silang (*cross-over*) dan mutasi gen yang akan digunakan. Perkawinan silang, adalah operator dari algoritma genetika yang melibatkan dua induk untuk membentuk kromosom baru. Perkawinan silang menghasilkan titik baru dalam ruang pencarian yang siap untuk diuji.

1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	Parent 1
1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	parent 2
1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	child 1
1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	child 2

**Gambar 2. 10** Ilustrasi Proses crossover

6. Tahap terakhir dari proses optimasi adalah mutasi gen, operaror ini berperan untuk menggantikan gen yang hilang dari populasi akibat proses

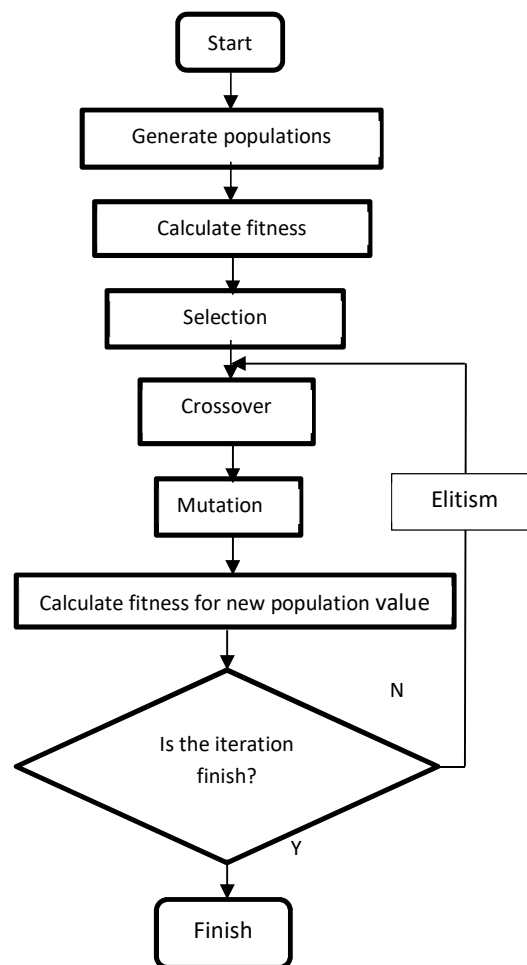


seleksi yang memungkinkan munculnya kembali gen yang tidak muncul pada inisialisasi populasi.

1	1	1	0	1	0	1	individu
1	1	1	1	1	0	1	individu

**Gambar 2. 11** Ilustrasi Proses Mutation

Proses diatas dapat digambarkan oleh bagan alur sebagai berikut :

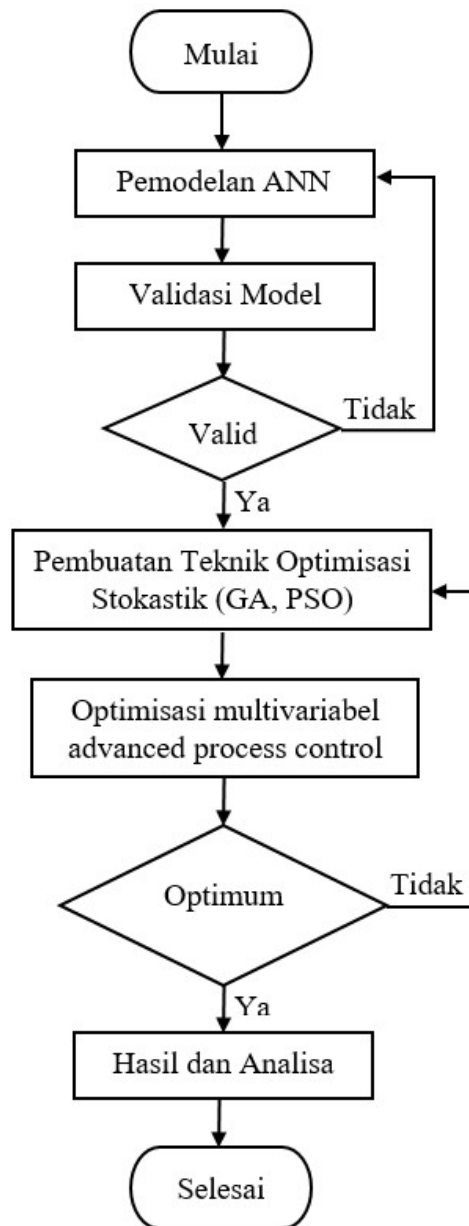


Gambar 2. 12 Diagram alir GA

### BAB 3

#### METODOLOGI PENELITIAN

Pada Tesis ini, prosedur penelitian secara garis besar digambarkan dalam diagram alir sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Bagan Alur Penelitian

### 3.1 Pengambilan Data Parameter *Gas Turbine Generator*

Data-data yang digunakan dalam tesis ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer adalah data yang diperoleh dari hasil pengukuran, perhitungan, dan pengamatan langsung di lapangan. Data sekunder adalah data yang bersumber dari buku referensi, jurnal, dan laporan yang relevan dengan pembahasan tesis ataupun yang terdapat pada lapangan (PT. Saka Indonesia Pangkah Ltd.). Pemodelan pada *Gas Turbine Generator* (GTG) di PT. SIPL dengan spesifikasi sesuai dengan Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Spesifikasi Gas Turbine Generator

Tag Number	660-G-01A/B/C
Type	GTG Centaur 40
Vendor	Solar Turbine
Capacity	3200 kW (ISO RATING)
Nominal Frequency	50 Hz
Turbine Speed	1500 rpm
Voltage	6600 V
Exhaust Mass flow	21,71 kg/s
Exhaust Gas Temperature	443 °C
Pressure Ratio	10,3
Momen Inertia	5220 lb-ft <sup>2</sup>
Constant Inertia	0,718 kWs/kVA

Data yang digunakan untuk melakukan pelatihan JST mengacu pada parameter pengukuran di *Offshore Facility*, data diambil melalui data logger di TT4000 selama 2 tahun terakhir (Tahun 2018 – 2020) dengan pemilihan beberapa parameter masukan pada JST seperti aliran fuel masukan, mass flow rate udara, tekanan dan temperature pada inlet Turbin Gas dan energi yang digunakan pada sistem bahan bakar di Turbin Gas.

Tabel 3. 2 Kebutuhan Data Penelitian

No	KEBUTUHAN DATA
1	Process Flow Diagram (PFD)
2	Piping & Instrument Diagram (P&ID)
3	SLD (Single Line Diagram)
5	Raw data input/output GTG
6	Produk hasil pembakaran di Turbin Gas
7	Jumlah unit, Spesifikasi equipment dan operasi

8	Konsumsi Energi, GCV/LHV bahan bakar
9	Data sheet, data operasi (P,T, Flowrate, property)

Data yang diperlukan untuk pemodelan berbasis JST dihasilkan untuk batasan operasional pada *Engine* menggunakan pelatihan JST pada perangkat lunak MatLab. Sekitar 8150 set data digunakan untuk melatih model berbasis JST yang akurat untuk tujuan identifikasi sistem. Dalam tesis ini, delapan variabel dianggap sebagai input yaitu *Temperature Enclosure*, *Air Supply Pressure*, *PCD (P1)*, *Actual Fuel Flow*, *Generator Total Load kW*, *T1 Temperature*, *Gas Fuel Temperature* dan *Air mass flow* sedangkan Output dari model terdiri dari tiga parameter Gas Turbine yaitu *Generator Capacity*, *Generator Efficiency* dan *T5 Average Temperature*. Data tersebut digunakan untuk melatih jaringan saraf MLP untuk memprediksi parameter output sistem berdasarkan nilai-nilai parameter input. Berikut ini data Input dan Output ANN untuk parameter *Gas Turbine Generator* yang akan dimodelkan menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan yang ditunjukkan pada Tabel 3.3 dan Tabel 3.4.

Tabel 3. 3 Data parameter Input ANN untuk pemodelan GTG

2		INPUT ANN							
3		Air Supply Pressure	PCD (P2)	Actual Fuel Flow	Generator Total Load	Temperature (T1)	Gas Fuel Temp	Turbine Air Inlet DP	Air mass flow
4	Time Stamp	barg	barg	Kg/second	kW	deg C	deg C	mbar	kg/second
5	7-9-18 14:00	7.3	6.9	0.116666667	537	26.7	44.9	12	1.079589909
6	7-9-18 15:00	7.27	7.04	0.129166667	833	26.1	48.2	12.2	1.534397773
7	7-9-18 16:00	7.27	7.05	0.132222222	847	27.8	48.3	11.8	1.537439966
8	7-9-18 17:00	7.33	7.01	0.130277778	784	28.4	48.3	12	1.454210614
9	7-9-18 18:00	7.33	7.02	0.131111111	798	28.9	48.3	11.9	1.473433347
10	7-9-18 19:00	7.29	7.04	0.132777778	820	29.2	48	11.9	1.505058403
11	7-9-18 20:00	7.27	7.1	0.132222222	802	25.2	47.5	11.8	1.47927608
12	7-9-18 21:00	7.26	7.15	0.135555556	839	24.7	46.3	12.1	1.527646943
13	7-9-18 22:00	7.33	7.12	0.133055556	793	24.4	45.8	12.2	1.464575761
14	7-9-18 23:00	7.33	7.12	0.131111111	793	24.8	45.8	12.1	1.467138841
15	8-9-18 0:00	7.3	7.1	0.131666667	833	25.2	45.8	12.1	1.528044092
16	8-9-18 1:00	7.27	7.12	0.132222222	808	23.5	45.6	11.9	1.491773107
17	8-9-18 2:00	7.26	7.16	0.142777778	821	22.7	44.7	12.4	1.513468038
18	8-9-18 3:00	7.35	7.16	0.136944444	851	22	43.8	12	1.562533929
19	8-9-18 4:00	7.32	7.16	0.134166667	844	21.8	43.1	12.2	1.552331518
20	8-9-18 5:00	7.29	7.16	0.133611111	846	21.7	42.6	12.2	1.548797578
21	8-9-18 6:00	7.26	7.18	0.135555556	800	21.6	42.6	12.1	1.476197592
22	8-9-18 7:00	7.27	7.21	0.140277778	903	21.6	43	11.9	1.62941702
23	8-9-18 8:00	7.35	7.16	0.135	807	21.9	43.9	12.2	1.489088732
8138	04/18/2020 16:0	7.27	6.88	0.128888889	855	22.8	49.8	11.7	1.533501733
8139	04/18/2020 17:0	7.19	6.9	0.127222222	839	22	48.8	11.8	1.506676343
8140	04/18/2020 18:0	7.29	6.93	0.128888889	848	21	48.2	11.7	1.515609953
8141	04/18/2020 19:0	7.21	6.95	0.129722222	841	20.7	47.8	11.8	1.500948726
8142	04/18/2020 20:0	7.27	6.9	0.1225	785	20	47.4	12.1	1.437618733
8143	04/18/2020 21:0	7.21	6.96	0.129166667	867	20.3	47.6	12.2	1.538713487
8144	04/18/2020 22:0	7.27	6.93	0.128333333	859	21.4	47.8	11.6	1.530666764
8145	04/18/2020 23:0	7.19	6.98	0.128333333	830	18.6	47.8	12	1.492760149
8146	04/19/2020 00:0	7.27	6.98	0.128888889	847	18.6	43.7	12.1	1.515402969
8147	04/19/2020 01:0	7.21	7.04	0.127222222	850	16.6	41.2	11.8	1.514235629
8148	04/19/2020 02:0	7.26	6.98	0.123888889	726	16.6	41.6	12.5	1.339035803
8149	04/19/2020 03:0	7.22	6.98	0.125833333	834	17.1	49.5	12.1	1.50132582
8150	04/19/2020 04:0	7.21	7.07	0.130277778	1017	16.9	44.6	12.3	1.737801973
8151	04/19/2020 05:0	7.24	7.01	0.127777778	817	16.6	44.8	12.1	1.470960867
8152	04/19/2020 06:0	7.19	7.01	0.127777778	829	18	44.9	12.1	1.48124857
8153	04/19/2020 07:0	7.27	7.01	0.129166667	834	18.1	45	12.1	1.491334384
8154									
8155	AVERAGE	7.2703	7.0282	0.1313	826.0809	23.4052	46.3027	12.0851	1.4964
8156	MIN	6.67	6.68	0.0775	283	14.9	35.2	11.3	0.6709
8157	MAX	7.39	7.53	0.242222222	1673	33.2	62.1	12.9	2.4475

Tabel 3. 4 Data parameter Output ANN untuk pemodelan GTG

	OUTPUT ANN		
	Generator Capacity (Calc Est) kW	Generator Efficiency %	T5 Average Temperature deg C
2			
3			
4			
5	2895	90.47%	362
6	2901	90.66%	384
7	2883	90.09%	395
8	2879	89.97%	389
9	2876	89.88%	391
10	2873	89.78%	393
11	2913	91.03%	385
12	2920	91.25%	389
13	2922	91.31%	384
14	2919	91.22%	382
15	2912	91.00%	385
16	2937	91.78%	381
17	2950	92.19%	385
18	2961	92.53%	380
19	2965	92.66%	378
20	2968	92.75%	380
21	2968	92.75%	380
22	2969	92.78%	386
23	2963	92.59%	380
3138	2948	92.13%	401
3139	2962	92.56%	399
3140	2980	93.13%	400
3141	2986	93.31%	401
3142	3000	93.75%	387
3143	2994	93.56%	401
3144	2970	92.81%	401
3145	3031	94.72%	393
3146	3033	94.78%	395
3147	3078	96.19%	392
3148	3081	96.28%	383
3149	3070	95.94%	389
3150	3074	96.06%	406
3151	3077	96.16%	390
3152	3043	95.09%	395
3153	3043	95.09%	395
3154			
3155	2948.6177	0.9214	393.5074
3156	2856	89%	332
3157	3127	98%	488

Dengan data yang cukup (pengambilan >8000 data), maka selanjutnya dilakukan pelatihan JST pada perangkat lunak MatLab. Pada pelatihan, pertama harus ditentukan apa saja yang akan dijadikan elemen masukan untuk dapat memperikarakan keluaran yang diharapkan. Dengan dasar kesetimbangan massa dan energi, maka dipilih delapan masukan dan tiga keluaran. Masukan dan keluaran JST dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 3. 5 Masukan dan keluaran JST

Masukan	Air Supply Pressure (barg)
	PCD /P2 (barg)
	Actual Fuel Flow (kg/s)
	Generator Total Load (kW)
	Temperature T1 (°C)
	Gas Fuel Temperature (°C)
	Turbine Air Inlet DP (mbar)
	Air mass flow (kg/s)



$$Max \eta_{Gen} = \frac{Output}{Input} = \frac{W_{net}}{W_{GT}} \times 100\% \quad (39)$$

Dimana:

$\eta_{Gen}$  = Efisiensi Generator (%)

$\dot{W}_{Net}$  = Net Power Generator (kW)

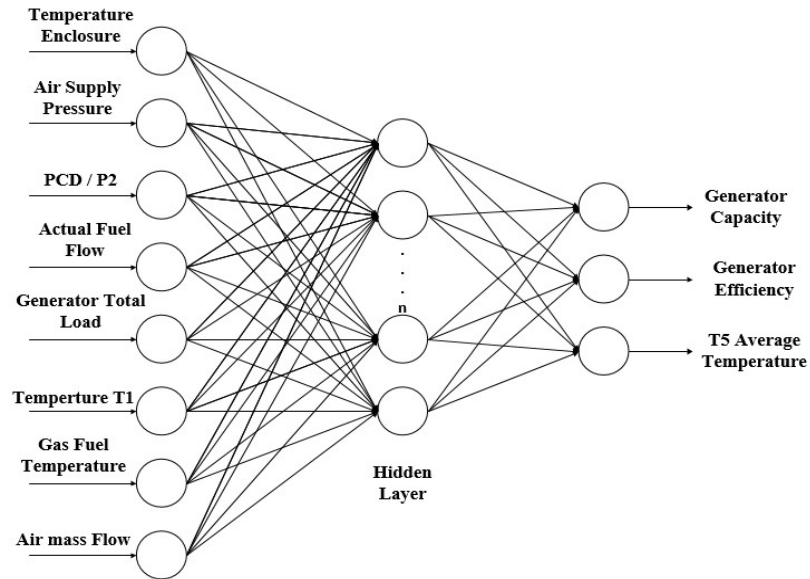
$W_{GT}$  = Design Capacity Turbin Generator (kW)

### 3.4 Pemodelan Jaringan Syaraf Tiruan

Pada penelitian ini, Jaringan syaraf tiruan digunakan sebagai model sistem yang hendak dioptimasi, JST yang digunakan merupakan jaringan syaraf tiruan dengan struktur Multi Layer Perceptron (MLP) dan dilatih dengan algoritma pelatihan Levenberg-Marquardt. Pada tahap ini beberapa hal yang harus diperhatikan adalah pemilihan input dan output dan penentuan jumlah hidden node. Pemilihan input dan output harus mengacu pada korelasi antara setiap input terhadap output, pemilihan yang kurang baik akan menghasilkan JST dengan akurasi yang kurang baik. Penentuan jumlah hidden node juga harus diperhatikan karena terlalu sedikit atau terlalu banyak jumlah hidden node yang digunakan pada JST juga mempengaruhi akurasi JST tersebut.

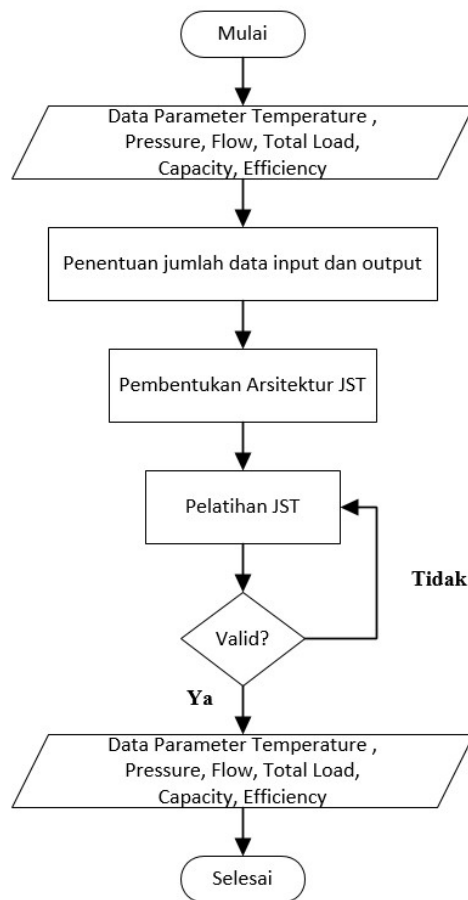
Sebelum dilakukan optimasi terlebih dahulu dilakukan pemodelan dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan. Dengan cara memodelkan parameter atau variabel yang dioptimasi sebagai *input* yaitu beberapa parameter *Temperature Enclosure, Air Supply Pressure, PCD (P1), Actual Fuel Flow, Generator Total Load kW, T1 Temperature, Gas Fuel Temperature, Air mass flow* dengan *output* berupa prediksi *Generator Capacity, Generator Efficiency* dan *T5 Average Temperature* menggunakan *neural network*. Pada penelitian ini, arsitektur JST (Jaringan Syaraf Tiruan) yang digunakan adalah JST *multilayer* dengan algoritma pelatihan *Levenberg-Marquardt*. Arsitektur tersebut ditunjukkan pada gambar dibawah.





Gambar 3. 3 Arsitektur JST yang digunakan pada penelitian Tesis

Kedelapan kotak menunjukan elemen bias yang bertindak sebagai variabel *input* pada jaringan syaraf tiruan. Sementara itu, garis panah yang menghubungkan masing-masing *node* pada arsitektur diatas memiliki bobot yang bernilai acak. Nilai bobot awal untuk masing-masing pelatihan akan berbeda satu sama lain sehingga bobot akhir masing-masing pelatihan pun akan berbeda.



Gambar 3. 4 Bagan alur pembuatan program JST

Algoritma pertama yang digunakan pada penelitian kali ini adalah menggunakan model jaringan syaraf tiruan. Dari bagan alur dapat diketahui bahwa langkah pertama yaitu mengambil data *input* pada *Gas Turbine Generator* yang sedang beroperasi sesuai dengan variabel yang dibutuhkan untuk melakukan prediksi kapasitas Generator dan efisiensi yang dihasilkan. Data yang sudah diperoleh kemudian dibagi menjadi 2 bagian yaitu data training (pelatihan) dan data validasi, dimana data yang digunakan untuk proses pelatihan lebih banyak dibandingkan proses validasi, dengan rincian 7000 data (87.5%) dari total keseluruhan data untuk pelatihan sedangkan sisanya yaitu 1000 data (12.5%) untuk validasi. Data-data tersebut nantinya akan berfungsi sebagai masukan neural network dan juga sebagai validasi dari hasil keluaran neural network.

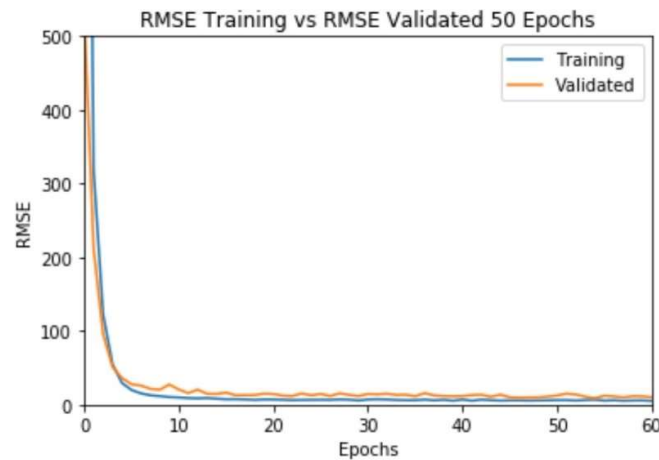
Data tersebut kemudian dilakukan *scaling* atau normalisasi sehingga memiliki *range* yang sama. Setelah itu, jumlah data untuk pelatihan dan validasi ditentukan

dan divariasikan. Terdapat variasi pada arsitekturnya yaitu variasi jumlah *hidden node*. Kemudian dilakukan pelatihan data menggunakan algoritma pembelajaran dari jaringan syaraf tiruan hingga iterasi ke 150. Hasil dari data pelatihan tersebut kemudian di validasi dan dilihat nilai RMSE yang terbaik dari semua variasi yang telah dilakukan. Sehingga akan diperoleh jumlah data validasi dan jumlah *hidden node* terbaik untuk melakukan prediksi kapasitas dan efisiensi yang dihasilkan Generator.

### 3.5 Validasi Model JST

Validasi model Gas Turbine Generator yang dibuat dilakukan dengan memberikan input yang belum pernah dilatihkan kepada JST dan mencatat RMSE yang terjadi sepanjang N sample validasi. Dasar penentuan model JST terbaik dari jumlah *hidden node* yang divariasikan berbeda terletak pada nilai RMSE (*Root Mean Squared Error*) rata-rata validasi masing-masing JST tersebut.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (40)$$



Gambar 3. 5 Grafik Data RMSE

### 3.6 Optimasi Efisiensi Generator Menggunakan Genetic Algorithm

Optimasi yang digunakan adalah *Genetic Algorithm*. *Genetic Algorithm* merupakan metode *adaptive* yang biasa digunakan untuk memecahkan suatu pencarian nilai dari sebuah masalah optimasi. Genetic Algorithm (GA) pada tesis ini dirancang supaya dapat menghasilkan nilai optimum yang terbaik. Bagian

tersulit dari perancangan GA adalah penentuan fungsi objektif dan fungsi fitness, karena sedikit kesalahan pada fungsi objektif maupun fungsi fitness dapat menghasilkan GA yang kurang baik dalam melakukan optimasi. Fungsi objektif GAO yang digunakan pada tesis ini adalah meningkatkan efisiensi generator dan memprediksi T5 average temperature, jadi ketika prediksi power generator dapat mencapai kapasitas maksimum T5 average temperature masih dibawah *setpoint high T5*.

Berikut ini merupakan beberapa langkah metode gabungan dari jaringan syaraf tiruan dan *genetic algorithm*.

Langkah 1:

Mendefinisikan individu, individu yang diambil adalah sekumpulan dari bobot JST

Langkah 2:

Membangkitkan populasi awal secara acak

Langkah 3:

Evaluasi nilai *fitness*

Nilai fitness adalah  $\frac{1}{RMSE}$  dengan nilai RMSE sebagai berikut

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (41)$$

dimana:

$y_i$  = Nilai actual

$\hat{y}_i$  = Nilai prediksi

N = Jumlah Data

Nilai prediksi merupakan nilai dari keluaran JST. berikut merupakan langkah untuk mendapatkan nilai prediksi:

- Pertama, menghitung nilai sinyal masukan ke *hidden node*.

$$y_{inj} = w_{oj} + \sum_{i=1}^n x_i w_{ij} \quad (42)$$

dimana

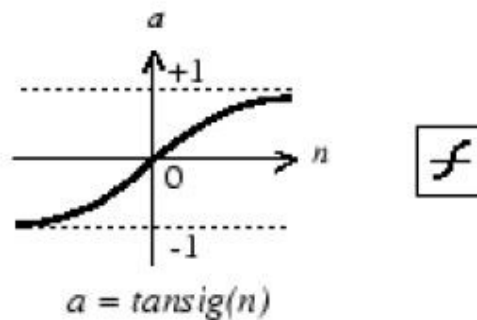
$y_{inj}$  = sinyal masukan ke *node* tersembunyi ( $j=1,2,3..n$ )

$w_{oj}$  = nilai bobot dari bias menuju *node* tersembunyi

$x_i$  = sinyal keluaran dari *node* masukan ( $i=1,2,3.... n$ )

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

- Kedua, menghitung sinyal keluaran dari *node* tersembunyi yang didapatkan dengan menerapkan sinyal masukan pada fungsi aktivasi. Fungsi aktivasi yang dapat digunakan yaitu fungsi aktivasi Tangen Sigmoid.



Gambar 3. 6 Fungsi aktivasi Tangen Sigmoid

Gambar 3,5 menunjukkan fungsi aktivasi dari jenis Tangen Sigmoid atau juga bisa disebut Tangen Hiperbolik. Dimana fungsi aktivasi ini memiliki interval dari -1 hingga 1. Sehingga, dapat digunakan persamaan berikut untuk mencari sinyal keluaran dari *hidden node*.

$$y_j = v_{ok} = \sum_{j=1}^n y_j v_{jk} \quad (43)$$

- Ketiga, menghitung nilai sinyal masukan ke *node* keluaran

$$z_{in,k} = v_{ok} + \sum_{j=1}^n y_j v_{jk} \quad (44)$$

dimana

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

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

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

$v_{jk}$  = nilai bobot dari *node* tersembunyi menuju keluaran

- Terakhir, memperoleh sinyal *node* tersembunyi menuju *node* keluaran dengan mengaplikasikan sinyal masukan pada fungsi aktivasi. Fungsi aktivasi yang dapat digunakan yaitu Tangen Sigmoid. Sehingga, persamaan berikut dapat digunakan untuk mencari sinyal keluaran dari *node* keluaran

$$z_k = \tanh(z_{in,k}) \quad (45)$$

Dimana:

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

Nilai sinyal keluaran dari *node* keluaran ini yang disebut nilai prediksi keluaran JST ( $F_i$ )

Langkah 4:

Seleksi individu, pemilihan individu berdasarkan nilai *fitness*. Semakin tinggi nilai *fitness* suatu individu maka semakin besar kemungkinan untuk terpilihnya. Teknik seleksi yang digunakan adalah *elitism*.

Langkah 5:

*Crossover*, salah satu operator yang melibatkan dua (individu) induk untuk menghasilkan keturunan yang baru. Melakukan pertukaran gen dari dua induk secara acak.

Langkah 6:

Mutasi gen, operator ini berperan sebagai operator yang menukar nilai gen dengan nilai inversinya, misalnya gen yang bernilai 0 akan ditukar menjadi gen bernilai 1 oleh operator ini. Setiap individu mengalami mutasi gen dengan probabilitas mutasi yang telah ditentukan yaitu antara 0-1. Mutasi gen dilakukan dengan memberikan nilai inversi atau menggeser nilai gen pada gen yang terpilih untuk dimutasikan

Langkah 7:

Bila kriteria yang diinginkan belum terpenuhi maka akan dibentuk lagi generasi baru dengan mengulang langkah 3 hingga langkah 7.

Setelah didapatkan hasil perhitungan optimasi tersebut, maka dilanjutkan dengan simulasi dengan bantuan software Matlab dan nantinya akan diketahui apakah hasil sudah optimum atau belum.

### **3.7 Analisa Data dan Penyusunan Laporan**

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan didapatkan data-data yang kemudian dilakukan analisa untuk menjawab tujuan dalam bentuk kesimpulan Tesis. Setelah melakukan analisa data maka dilanjutkan dengan penyusunan laporan Tesis.

## BAB 4

### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Pemilihan Variabel dan Perhitungan Performansi Turbin Gas

Pada bagian ini, kita akan melakukan analisis perhitungan untuk operasi turbin gas dengan menggunakan data operasi turbin gas GTG-B Type Centaur-40, data diambil saat sistem telah berada pada kondisi steady state.

Setelah dilakukan pengambilan data pada plant *Gas Turbine Generator* Centaur-40, maka didapatkan variabel input dan variabel output seperti pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2. Berikut merupakan data parameter pada gas turbine generator yang akan dimodelkan menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan.

Tabel 4. 1 Data parameter Input ANN untuk pemodelan GTG

2		INPUT ANN							
3	Time Stamp	Air Supply Pressure barg	PCD (P2) barg	Actual Fuel Flow Kg/second	Generator Total Load kW	Temperature (T1) deg C	Gas Fuel Temp deg C	Turbine Air Inlet DP mbar	Air mass flow kg/second
4	7-9-18 14:00	7.3	6.9	0.116666667	537	26.7	44.9	12	1.079589909
6	7-9-18 15:00	7.27	7.04	0.129166667	833	26.1	48.2	12.2	1.534397773
7	7-9-18 16:00	7.27	7.05	0.132222222	847	27.8	48.3	11.8	1.537439966
8	7-9-18 17:00	7.33	7.01	0.130277778	784	28.4	48.3	12	1.454210614
9	7-9-18 18:00	7.33	7.02	0.131111111	798	28.9	48.3	11.9	1.473433347
10	7-9-18 19:00	7.29	7.04	0.132777778	820	29.2	48	11.9	1.505058403
11	7-9-18 20:00	7.27	7.1	0.132222222	802	25.2	47.5	11.8	1.47927608
12	7-9-18 21:00	7.26	7.15	0.135555556	839	24.7	46.3	12.1	1.527646943
13	7-9-18 22:00	7.33	7.12	0.133055556	793	24.4	45.8	12.2	1.464575761
14	7-9-18 23:00	7.33	7.12	0.131111111	793	24.8	45.8	12.1	1.467138841
15	8-9-18 0:00	7.3	7.1	0.131666667	833	25.2	45.8	12.1	1.528044092
16	8-9-18 1:00	7.27	7.12	0.132222222	808	23.5	45.6	11.9	1.491773107
17	8-9-18 2:00	7.26	7.16	0.142777778	821	22.7	44.7	12.4	1.513468038
18	8-9-18 3:00	7.35	7.16	0.136944444	851	22	43.8	12	1.562533929
19	8-9-18 4:00	7.32	7.16	0.134166667	844	21.8	43.1	12.2	1.552331518
20	8-9-18 5:00	7.29	7.16	0.133611111	846	21.7	42.6	12.2	1.548797578
21	8-9-18 6:00	7.26	7.18	0.135555556	800	21.6	42.6	12.1	1.476197592
22	8-9-18 7:00	7.27	7.21	0.140277778	903	21.6	43	11.9	1.62941702
23	8-9-18 8:00	7.35	7.16	0.135	807	21.9	43.9	12.2	1.489088732
8138	04/18/2020 16:0	7.27	6.88	0.128888889	855	22.8	49.8	11.7	1.533501733
8139	04/18/2020 17:0	7.19	6.9	0.127222222	839	22	48.8	11.8	1.506676343
8140	04/18/2020 18:0	7.29	6.93	0.128888889	848	21	48.2	11.7	1.515609953
8141	04/18/2020 19:0	7.21	6.95	0.129722222	841	20.7	47.8	11.8	1.500948726
8142	04/18/2020 20:0	7.27	6.9	0.1225	785	20	47.4	12.1	1.437618733
8143	04/18/2020 21:0	7.21	6.96	0.129166667	867	20.3	47.6	12.2	1.538713487
8144	04/18/2020 22:0	7.27	6.93	0.128333333	859	21.4	47.8	11.6	1.530666764
8145	04/18/2020 23:0	7.19	6.98	0.128333333	830	18.6	47.8	12	1.492760149
8146	04/19/2020 00:0	7.27	6.98	0.128888889	847	18.6	43.7	12.1	1.515402969
8147	04/19/2020 01:0	7.21	7.04	0.127222222	850	16.6	41.2	11.8	1.514235629
8148	04/19/2020 02:0	7.26	6.98	0.123888889	726	16.6	41.6	12.5	1.339035803
8149	04/19/2020 03:0	7.22	6.98	0.125833333	834	17.1	43.5	12.1	1.50132582
8150	04/19/2020 04:0	7.21	7.07	0.130277778	1017	16.9	44.6	12.3	1.737801973
8151	04/19/2020 05:0	7.24	7.01	0.127777778	817	16.6	44.8	12.1	1.470960867
8152	04/19/2020 06:0	7.19	7.01	0.127777778	829	18	44.9	12.1	1.48124857
8153	04/19/2020 07:0	7.27	7.01	0.129166667	834	18.1	45	12.1	1.491334384
8154									
8155	AVERAGE	7.2703	7.0282	0.1313	826.0809	23.4052	46.3027	12.0851	1.4964
8156	MIN	6.67	6.68	0.0775	283	14.9	35.2	11.3	0.6709
8157	MAX	7.39	7.53	0.242222222	1673	33.2	62.1	12.9	2.4475



Tabel 4. 2 Data parameter Output ANN untuk pemodelan GTG

OUTPUT ANN					
	Time Stamp	Generator Capacity (Calc Est) kW	Generator Efficiency %	T5 Average Temperature deg C	Spin Reserve kW
5	7-9-18 14:00	2895	90.47%	362	2357
6	7-9-18 15:00	2901	90.66%	384	2067
7	7-9-18 16:00	2883	90.09%	395	1980
8	7-9-18 17:00	2879	89.97%	389	2094
9	7-9-18 18:00	2876	89.88%	391	2077
10	7-9-18 19:00	2873	89.78%	393	2053
11	7-9-18 20:00	2913	91.03%	385	2110
12	7-9-18 21:00	2920	91.25%	389	2080
13	7-9-18 22:00	2922	91.31%	384	2129
14	7-9-18 23:00	2919	91.22%	382	2126
15	8-9-18 0:00	2912	91.00%	385	2107
16	8-9-18 1:00	2937	91.78%	381	2128
17	8-9-18 2:00	2950	92.19%	385	2129
18	8-9-18 3:00	2961	92.53%	380	2109
19	8-9-18 4:00	2965	92.66%	378	2121
20	8-9-18 5:00	2968	92.75%	380	2121
21	8-9-18 6:00	2968	92.75%	380	2167
22	8-9-18 7:00	2969	92.78%	386	2066
23	8-9-18 8:00	2963	92.59%	380	2156
8138	04/18/2020 16:0	2948	92.13%	401	2092
8139	04/18/2020 17:0	2962	92.56%	399	2122
8140	04/18/2020 18:0	2980	93.13%	400	2132
8141	04/18/2020 19:0	2986	93.31%	401	2145
8142	04/18/2020 20:0	3000	93.75%	387	2214
8143	04/18/2020 21:0	2994	93.56%	401	2127
8144	04/18/2020 22:0	2970	92.81%	401	2111
8145	04/18/2020 23:0	3031	94.72%	393	2200
8146	04/19/2020 00:0	3033	94.78%	395	2185
8147	04/19/2020 01:0	3078	96.19%	392	2227
8148	04/19/2020 02:0	3081	96.28%	383	2354
8149	04/19/2020 03:0	3070	95.94%	389	2236
8150	04/19/2020 04:0	3074	96.06%	406	2056
8151	04/19/2020 05:0	3077	96.16%	390	2264
8152	04/19/2020 06:0	3043	95.09%	395	2213
8153	04/19/2020 07:0	3043	95.09%	395	2208
8154					
8155	AVERAGE	2948.6177	0.9214	393.5074	2122.1221
8156	MIN	2856	89%	332	1251
8157	MAX	3127	98%	488	2642

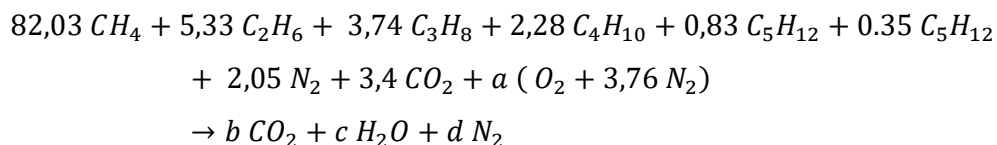
Perhitungan optimasi turbin gas dipengaruhi oleh komposisi bahan bakar yang menentukan *Cp combustion product*. Untuk mengetahui *Cp combustion product* didapat dari mengkalikan nilai *Cp* tiap komponen dengan persentasenya kemudian dijumlahkan. Selanjutnya untuk mengetahui reaksi kimia dari pembakaran bahan bakar secara sempurna dan mendapatkan nilai rasio udara dan bahan bakar ideal, diperlukan data terkait komposisi bahan bakar yang digunakan turbin gas seperti table berikut:

Tabel 4. 3 Data Komposisi, Presentase dan Specific Heat Bahan Bakar Gas

Gas Composition	Unit	Fuel Gas	SG total	Cp (kJ/kg. K)	Cp * %mol
Metana	%Mol	82,03	0,7168	2,22	1,821066
Etana	%Mol	5,33		1,75	0,093275
Propana	%Mol	3,74		1,5	0,0561
i-Butana	%Mol	1,03		1,67	0,017201
n-Butana	%Mol	1,25		1,675	0,0209375

i-Pentana	%Mol	0,5		0,228	0,00114
n-Pentana	%Mol	0,33		0,167	0,0005511
n-Hexana	%Mol	0,35		0,165	0,0005775
Nitrogen	%Mol	2,05		1,04	0,02132
CO2	%Mol	3,4		0,821	0,027914
				Cp Total	2,0600821

Dari data komposisi tersebut dibuat reaksi pembakaran sempurna untuk mengetahui nilai rasio udara dan bahan bakar ideal :



Koefisien a , b , c , dan d dapat diketahui melaalui persamaan berikut :

Jumlah Mol Carbon (x)

$$\begin{aligned}
 x = b &= 82,03 (1) + 5,33 (2) + 3,74 (3) + 2,28 (4) + 0,83 (5) + 0,35(6) + 3,4 (1) = \\
 &122,68
 \end{aligned}$$

Jumlah Mol Hidrogen (y)

$$y = 82,03 (4) + 5,33 (6) + 3,74 (8) + 2,28 (10) + 0,83 (12) + 0,35(14) = 427,68$$

$$c = y/2 = 427,68 / 2 = 213,84$$

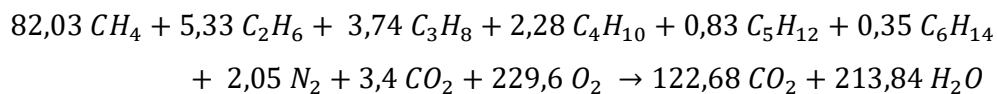
Mol udara yang dibutuhkan

$$a = x + y/4 = 122,68 + (427,68/4) = 122,68 + 106,92 = 229,6$$

Mol Nitrogen

$$d = 3,76 a + 2,05 = 3,76 (229,6) + 2,05 = 865,346$$

Sehingga, reaksi pembakaran sempurna dari komposisi bahan bakar tersebut adalah:



Massa Molekul Relatif (Mr) bahan bakar

$$Mr = 82,03 (16) + 5,33 (30) + 3,74 (44) + 2,28 (58) + 0,83 (72) + 0,35 (86) + 3,4 (44) + 2,05 (28) = 2066,04 \text{ kg/mol}$$

Massa Molekul Relatif (Mr) udara

$$Mr = 29 \text{ kg/mol}$$

Rasio udara dan bahan bakar :

$$AFR = \frac{m_{udara}}{m_{fuel}} = \frac{229,6 (4,76)(29)}{1 (2066,04)} = 15,342$$

Harga properties bahan bakar (natural gas) dan udara yang digunakan pada perhitungan ini, dapat dilihat pada tabel 4.4

Tabel 4. 4 Data properties natural gas dan udara [22]

Input	k	P	Cp	Cv
Udara	1.4	1.2	1.01	0.718
Natural Gas	1.3	0.9	2.34	1.85
Unit		Kg/m <sup>3</sup>	kJ/kg.K	kJ/kg.K

#### 4.2 Perhitungan Sebelum dilakukan Optimasi

Untuk properties yang diketahui pada GTG-B bisa dilihat pada tabel 4.5 di bawah ini yang diperoleh pada saat GTG-B beroperasi pada tanggal 12 April 2019 Jam 14:00:01. Dari tabel tersebut kita bisa mencari properties untuk setiap *state* yang dibutuhkan dalam perhitungan performa turbin gas.

Tabel 4. 5 Data Operasi GTG-B

Input	Value	Unit
Design Capacity (W)	3.2	MW
Daya sebenarnya (W actual)	870	KW
Laju aliran bahan bakar ( $\dot{m}_{bb}$ )	464	kg/h

Efisiensi generator	89.44	%
Temperatur masuk kompresor (T1)	304.05	K
Tekanan masuk kompresor (P1)	100.03	kPa
Temperatur keluar kompresor (T2)	590.8	K
Tekanan keluar kompresor (P2)	685	kPa
Temperatur keluar turbin (T4)	668.15	K
Tekanan keluar turbin (P4)(abs)	101.98	kPa
LHV	42624.23	kJ/m <sup>3</sup>
Specific heat combustion product	2.06008	KJ/Kg.K

#### 4.2.1 Properties untuk setiap state

##### a. State 1

Pada state ini udara dari luar (udara ruangan/atmosfir) masuk melalui inlet air filter menuju ke kompresor. Dari tabel operasi, didapatkan data yaitu:

$$T_1 = 304.05 \text{ K}$$

$$P_1 = 100,03 \text{ kPa}$$

Untuk mencari entalpi fluida kita menggunakan tabel termodinamika dari “Fundamental of Engineering Thermodynamics” 7th edition karangan Michael J. Moran dan Howard N. Saphiro pada bagian tabel A-22 Ideal Gas Properties of Air (terdapat pada lampiran). Besar enthalpy didapatkan dengan menggunakan proses interpolasi sehingga diperoleh:

$$h_1 = 304.25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Dengan menggunakan rumus  $P_1 V_1 = RT_1$ , dimana nilai R untuk konstanta gas universal nilainya sebagaimana ditentukan secara eksperimental adalah 8.314 kJ/kmol.K, maka besar  $V_1$  pada state 1 dapat dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$V_1 = \frac{RT_1}{MP_1}$$

Untuk mencari nilai M (*molecular weight*) udara kita menggunakan tabel termodinamika dari “Fundamental of Engineering Thermodynamics” 7th edition karangan Michael J. Moran dan Howard N. Saphiro pada bagian tabel A-1 (terdapat pada lampiran).

$$V_1 = \frac{RT_1}{MP_1}$$

$$V_1 = \frac{(8314 \frac{N.m}{kmol.K})(304.05 K)}{(28.97 \frac{kg}{kmol})(100,03 \times 10^3 \frac{N}{m^2})}$$

$$V_1 = 0.87232 m^3/kg$$

b. State 2

Pada titik ini udara yang masuk ke kompresor akan dikompresikan keluar menuju ke ruang bakar, dimana fluida udara tersebut mempunyai tekanan dan temperatur yang tinggi. Dari tabel operasi, didapatkan data yaitu:

$$T_2 = 590.8 K$$

$$P_2 = 685 KPa$$

Untuk mencari entalpi fluida kita menggunakan tabel termodinamika dari “Fundamental of Engineering Thermodynamics” 7th edition karangan Michael J. Moran dan Howard N. Saphiro pada bagian tabel A-22 Ideal Gas Properties of Air (terdapat pada lampiran). Besar enthalpy didapatkan dengan menggunakan proses interpolasi sehingga diperoleh:

$$h_2 = 597.328 \frac{kJ}{kg}$$

Karena pada state 2 ini berlangsung proses kompresi isentropik maka:

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_{2s} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_{2s} = 304.05 \left(\frac{685}{100,03}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}$$

$$= 304.5 \times 1.732$$

$$= 527.394 K$$

$$h_{2s} = 531.075 \frac{kJ}{kg}$$

Untuk menghitung  $V_2$  pada state 2 dapat digunakan cara sebagai berikut:

$$V_2 = \frac{RT_{2s}}{MP_2}$$

$$V_2 = \frac{(8314 \frac{N.m}{kmol.K})(527.394 K)}{(28.97 \frac{kg}{kmol})(685 \times 10^3 \frac{N}{m^2})}$$

$$V_2 = 0.220 m^3/kg$$

c. State 3

Pada tahap ini terjadi proses pembakaran di dalam ruang bakar (*combustion chamber*) dan fluida bahan bakar natural gas diinjeksikan sehingga bercampur dengan udara dan terjadi proses pembakaran. Fuel gas yang sudah terbentuk dari pembakaran akan keluar dari ruang bakar menuju turbin.

Dari data Vendor didapatkan tekanan keluar kompresor dan tekanan keluar ruang bakar mengalami penurunan tekanan 2.5%, setelah nilai pressure drop diketahui, maka besar  $P_3$  dapat dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$Pressure\ drop = \frac{(P_2 - P_3)}{P_2}$$

$$0.025 = \frac{685\ kPa - P_3}{695\ kPa}$$

$$0.025 \times 685\ kPa = 685\ kPa - P_3$$

$$P_3 = 667.88\ kPa$$

Setelah didapatkan nilai  $P_3$ , serta dengan menggunakan nilai rasio spesifik,  $k=1,3$  seperti yang dicantumkan di Tabel 4.4 (sumber: Engineering Toolbox), maka temperatur masuk turbin dapat dicari dengan cara sebagai berikut:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_3 = T_4 \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$= 668.15 \left(\frac{667.88\ kPa}{101.98\ kPa}\right)^{\frac{1.3-1}{1.3}}$$

$$= 668.15\ K \times 1.542$$

$$= 1030.917\ K$$

Dengan  $C_p \text{ combustion product} = 2.0600821 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$  dan  $h = C_p \times T_3$  maka:

$$\begin{aligned} h_3 &= C_p \text{ combustion product} \times T_3 \\ &= 2.0600821 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times 1030.917 \text{ K} \\ &= 2123.775 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Untuk menghitung  $V_3$  pada state 3 dapat digunakan cara sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_3 &= \frac{RT_3}{MP_3} \\ &= \frac{(8314 \frac{\text{N.m}}{\text{kmol.K}})(1030.917 \text{ K})}{(28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})(667.88 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2})} \\ V_3 &= 0.442 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

d. State 4

Pada state ini terjadi ekspansi gas buang hasil pembakaran dari dalam turbin. Pada proses ini terjadi gesekan antara gas hasil pembakaran dengan sudu-sudu turbin, sehingga temperatur gas buang yang keluar dari turbin menjadi lebih tinggi dari gas ideal (isentropis).

$$T_4 = 668.15 \text{ K}$$

$$P_4 = 101.98 \text{ kPa}$$

Dengan  $C_p \text{ combustion product} = 2.0600821 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$  dan  $h = C_p \times T_4$  maka:

$$\begin{aligned} h_4 &= C_p \text{ combustion product} \times T_4 \\ &= 2.0600821 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times 668.15 \text{ K} \\ &= 1376.44 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Karena pada state 4 ini berlangsung proses isentropis maka :

$$\begin{aligned} T_{4s} &= T_3 \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \\ &= 1030.917 \text{ K} \left( \frac{101.98 \text{ kPa}}{667.88 \text{ kPa}} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} \\ &= 1030.917 \text{ K} \times 0.584 \end{aligned}$$

$$= 602.05 \text{ K}$$

Dengan  $C_p \text{ combustion product} = 2.0600821 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$  dan  $h = C_p \times T_{4s}$  maka:

$$h_{4s} = C_p \text{ combustion product} \times T_{4s}$$

$$= 2.0600821 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times 602.05 \text{ K}$$

$$= 1240.272 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Untuk menghitung  $V_4$  pada state 4 dapat digunakan cara sebagai berikut:

$$V_4 = \frac{RT_{4s}}{MP_4}$$

$$V_4 = \frac{(8314 \frac{\text{N.m}}{\text{kmol.K}})(602.05 \text{ K})}{(28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})(101.98 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2})}$$

$$V_4 = 1.694 \text{ m}^3/\text{kg}$$

#### 4.2.2 Perhitungan Performa Turbin Gas

Untuk perhitungan  $\dot{W}_{\text{kompressor}}$  kita menggunakan data-data properties pada generator. Perhitungan tersebut menggunakan persamaan:

$$\dot{W}_{\text{kompressor}} = \dot{m}_{\text{udara}} \times (h_2 - h_1)$$

Diperlukan hasil perhitungan dari  $\dot{m}_{\text{udara}}$  maka dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$\dot{m}_{\text{udara}} = \frac{A}{F} \times \dot{m}_{bb}$$

Berdasarkan data lapangan sudah diketahui massa bahan bakar (kg/s), maka tidak perlu digunakan formula diatas, maka harga dari  $\dot{m}_{bb}$  yaitu sebesar 464 kg/h

$$\dot{m}_{bb} = \frac{464 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} = 0.1288 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$W_{\text{nett}} = (W_T - W_C)$$



Untuk menghitung Effisiensi Gas Turbin dapat digunakan cara berikut:

$$\begin{aligned}\eta_{turbin} &= \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \times 100\% \\ &= \frac{2123.775 \frac{kJ}{kg} - 1376.44 \frac{kJ}{kg}}{2123.775 \frac{kJ}{kg} - 1240.272 \frac{kJ}{kg}} \times 100\% \\ &= \frac{747.335 \frac{kJ}{kg}}{883.503 \frac{kJ}{kg}} \times 100\% \\ &= 84.587 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_{kompresor} &= \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \times 100\% \\ &= \frac{531.075 \frac{kJ}{kg} - 304.25 \frac{kJ}{kg}}{597.328 \frac{kJ}{kg} - 304.25 \frac{kJ}{kg}} \times 100\% \\ &= \frac{226.825 \frac{kJ}{kg}}{293.078 \frac{kJ}{kg}} \times 100\% \\ &= 77.39\%\end{aligned}$$

Perhitungan daya netto yang dihasilkan Turbin Gas adalah selisih antara daya yang dihasilkan turbin dengan daya yang dibutuhkan kompresor

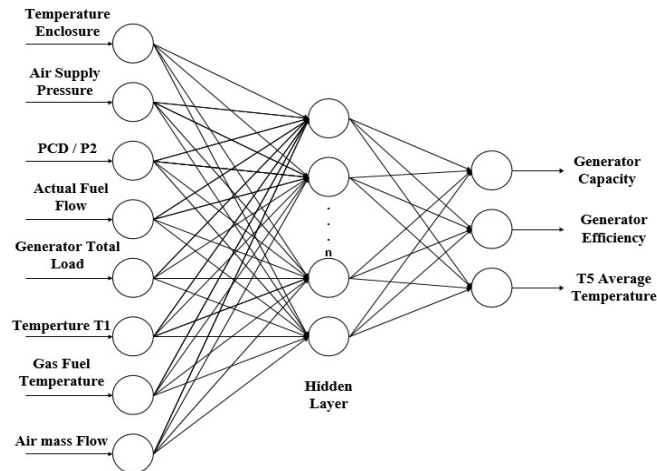
$$\begin{aligned}W_{nett} &= \left( (\dot{m}_{fuel\ gas} + \dot{m}_{udara})(h_3 - h_4) \right) - \dot{m}_{udara}(h_2 - h_1) \\ W_{nett} &= \left[ 1 + \left( \frac{A}{F} \right) \right] \dot{m}_{bb}(h_3 - h_4) - \left( \frac{A}{F} \right) \dot{m}_{bb}(h_2 - h_1) \\ W_{nett} &= [1 + 11.78] \times 0.1288 \frac{kg}{s} \left( 2130.87 \frac{kJ}{kg} - 1376.44 \frac{kJ}{kg} \right) \\ &\quad - 11.78 \times 0.1288 \frac{kg}{s} (621.07 \frac{kJ}{kg} - 304.25 \frac{kJ}{kg})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W_{nett} &= [12.78] \times 0.1288 \frac{kg}{s} \times 754.43 \frac{kJ}{kg} \\
&\quad - 11.78 \times 0.1288 \frac{kg}{s} \times 316.82 \frac{kJ}{kg} \\
W_{nett} &= 1241.84 \frac{kJ}{s} - 480.699 \frac{kJ}{s} \\
&= 761.14 \frac{kJ}{s}
\end{aligned}$$

### 4.3 Pemodelan dan Validasi Jaringan Syaraf Tiruan

Pada penelitian ini dilakukan optimasi pada sistem Gas Turbine Generator. Variabel yang dioptimasi tersebut dilakukan analisa terkait dengan pengaruhnya terhadap efisiensi gas turbine generator dan T5 average temperature. Selanjutnya data parameter pada turbin gas seperti pada Tabel 4.2 dilakukan pemodelan menggunakan jaringan syaraf tiruan, algoritma pelatihan yang dipakai adalah menggunakan *Lavenberg-Marquardt*. Hasil pemodelan tersebut dioptimasi menggunakan algoritma genetika untuk mendapatkan nilai variabel yang dioptimasi sehingga mendapatkan hasil yang optimal sesuai dengan *objective function*.

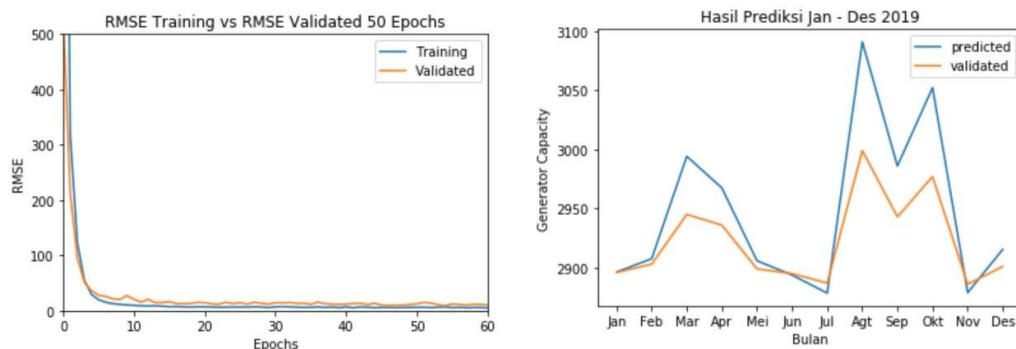
Sebelum dilakukan optimasi terlebih dahulu dilakukan pemodelan dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan. Dengan cara memodelkan parameter atau variabel yang dioptimasi sebagai *input* yaitu beberapa parameter yang mempengaruhi performansi gas turbin yaitu parameter PCD (Pressure Compressor Discharge), actual fuel flow, load generator, temperatur inlet engine (T1), temperatur fuel gas, turbine air inlet DP, air mass flow. Sedangkan *output* berupa prediksi kapasitas generator, efisiensi generator dan T5 average temperature. Pada dasarnya proses training adalah untuk menentukan bobot antara *input layer* dengan *hidden layer* serta bobot antara *hidden layer* dengan *output layer*. Berikut merupakan arsitektur jaringan syaraf tiruan yang digunakan untuk memodelkan sistem.



Gambar 4. 1 Arsitektur JST yang digunakan untuk memodelkan sistem

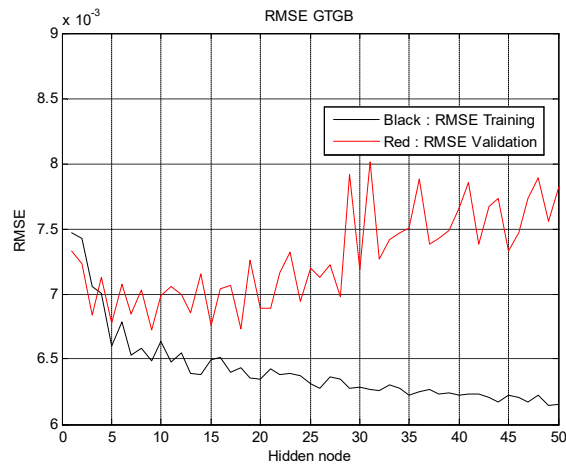
Pada arsitektur jaringan syaraf tiruan jumlah *hidden node* akan mempengaruhi keakuratan hasil keluaran dari JST tersebut [23]. Pada penelitian ini arsitektur jaringan syaraf tiruan yang digunakan adalah dengan menggunakan satu *input layer*, satu *hidden layer*, dan satu *output layer*. Dimana pada *hidden layer* terdapat beberapa *hidden node* yang mana nantinya akan mempengaruhi performa dari hasil pelatihan dan validasi dari prediksi yang akan dilakukan. Maka untuk mengetahui jumlah *hidden node* yang terbaik adalah mengamati nilai RMSE terkecil pada saat jumlah *hidden node* tertentu.

Gambar 4.2 menunjukkan grafik data RMSE terhadap fungsi epoch dan prediksi dari hasil simulasi menunjukkan nilai generator capacity telah mendekati hasil pemodelan.



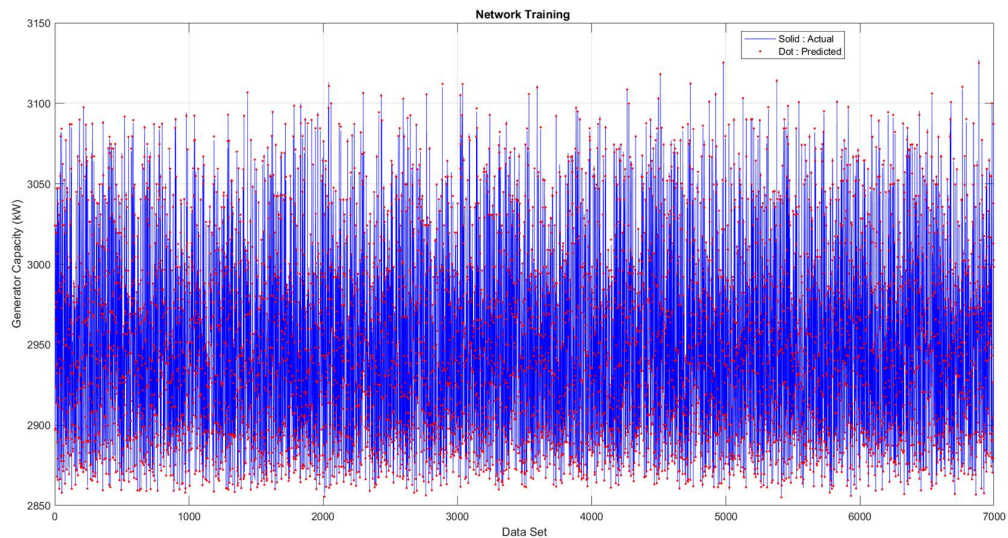
Gambar 4. 2 Grafik data RMSE dan respon terhadap generator capacity

Berikut merupakan grafik nilai RMSE terhadap jumlah *node* yang terdapat pada *hidden layer*.

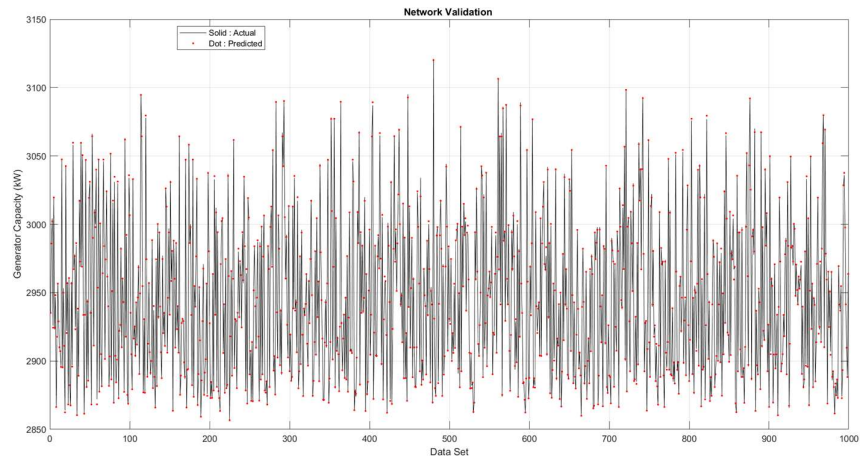


Gambar 4. 3 Grafik nilai RMSE pemodelan gas turbin generator dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan

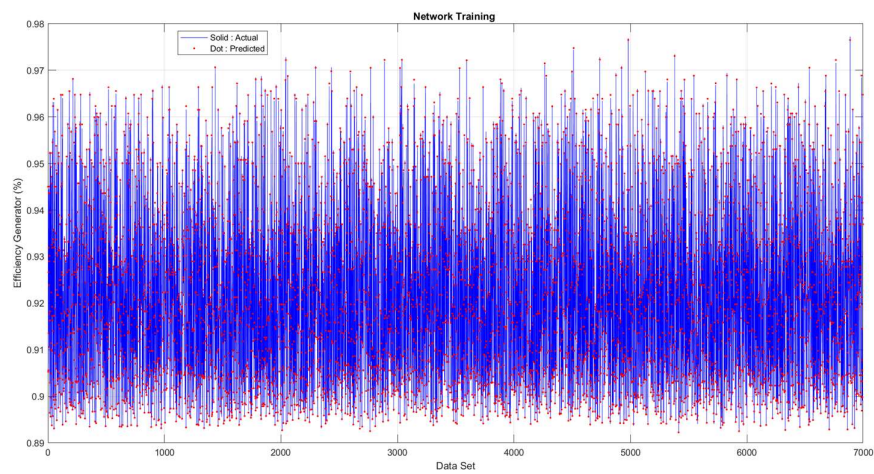
Dapat dilihat hasil prediksi berupa nilai RMSE seperti gambar diatas maka akan mendapatkan *hidden node* terbaik pada  $HN = 9$  yaitu sebesar 0.0066. Dari hasil prediksi tersebut diperoleh grafik hasil pelatihan data dan validasi data untuk Generator Capacity, Generator Percent Efficiency dan T5 Average Temperature sebagai berikut:



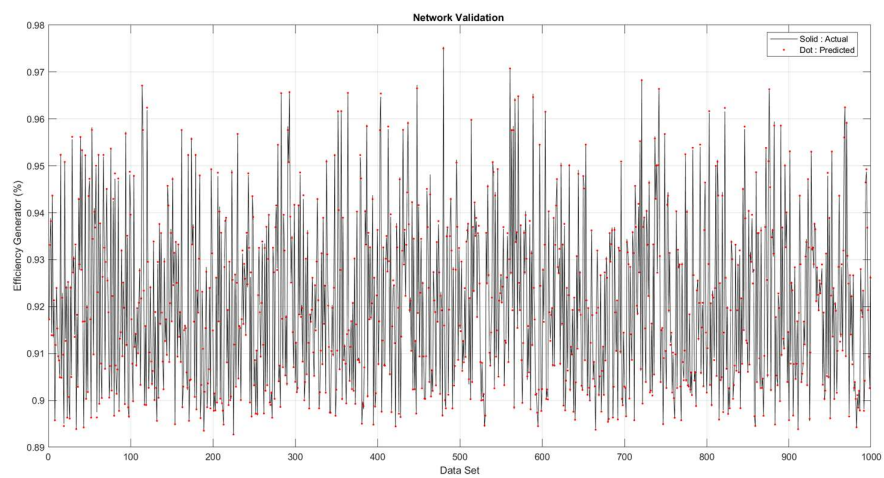
Gambar 4. 4 Grafik Data Training NN Generator Capacity – Power kW



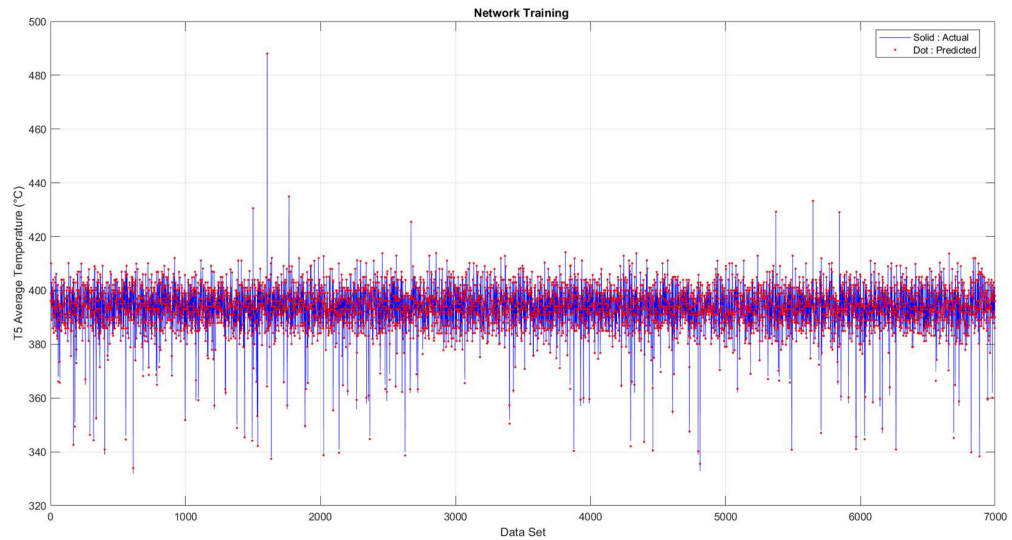
Gambar 4. 5 Grafik Data Validasi NN Generator Capacity – Power kW



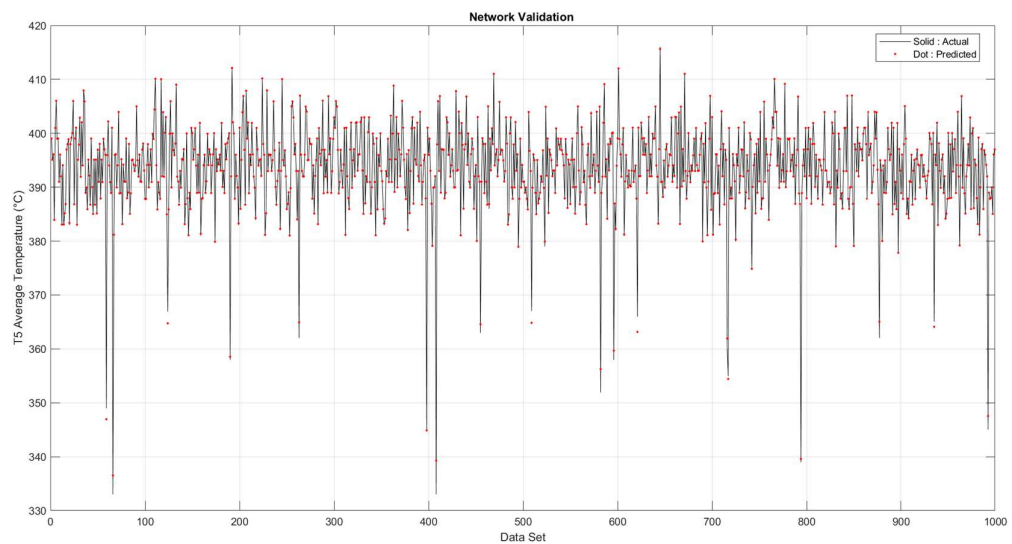
Gambar 4. 6 Grafik Data Training NN Generator Percent Efficiency



Gambar 4. 7 Grafik Data Validasi NN Generator Percent Efficiency



Gambar 4. 8 Grafik Data Training NN T5 Average Temperature (° C)



Gambar 4. 9 Grafik Data Valisai NN T5 Average Temperature (° C)

Data yg digunakan adalah sebagai berikut:

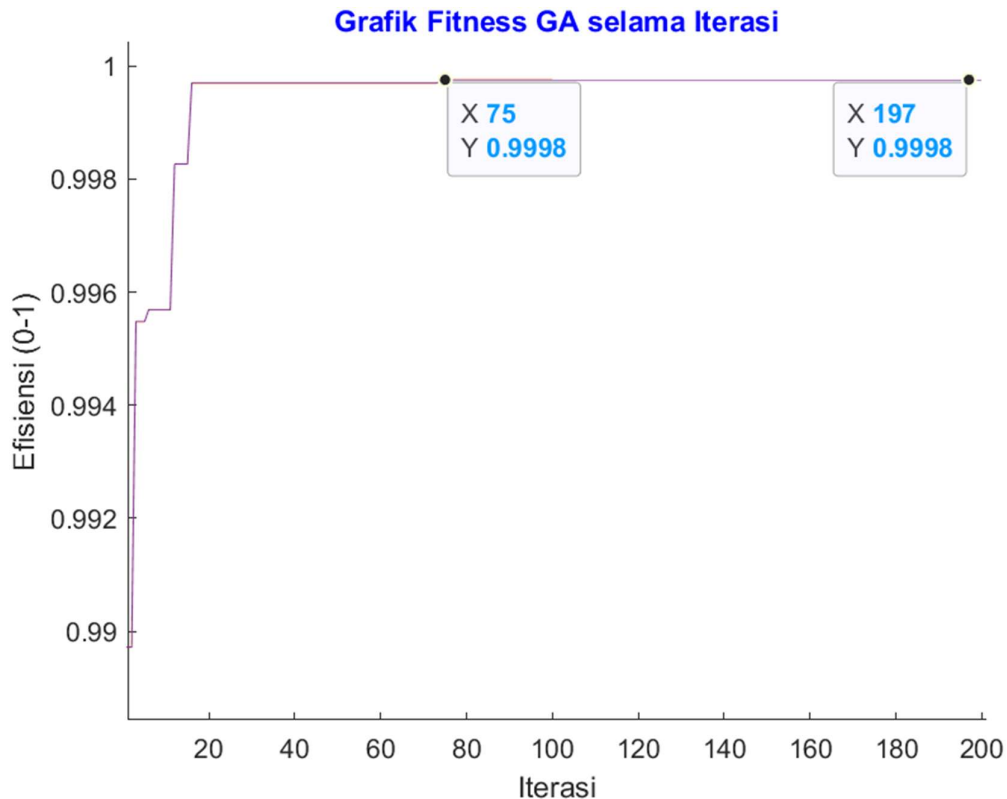
Tabel 4. 6 Tabel Data Training dan Validasi

Data Training:	Data Validasi:	Seluruh data
$ut = A(4:7000,1:8)'$ ;	$uv = A(7001:8000,1:8)'$ ;	$us = A(4:8000,1:8)'$ ;
$yt = A(4:7000,9:11)'$ ;	$yv = A(7001:8000,9:11)'$ ;	$ys = A(4:8000,9:11)'$ ;

#### 4.4 Optimasi turbin generator dengan menggunakan Algoritma Genetik

Hasil pemodelan JST yang telah dilakukan melalui proses *training* dan *validasi* dioptimasi menggunakan algoritma genetik. Optimasi algoritma genetik dilakukan untuk memperoleh nilai dari variabel pada operasi Turbine Gas Generator untuk menghasilkan nilai efisiensi tertinggi, sehingga didapatkan variabel input yang terbaik.

Grafik optimasi *genetic algorithm* dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 4. 10 Grafik optimasi penggunaan arus listrik

Pada grafik diatas menjelaskan nilai *fitness* ( $\eta_{max}$ ) terbaik didapatkan pada generasi 75 sebesar 99.98% Efficiency. Nilai tersebut merupakan nilai maksimum

Untuk menganalisa performansi hasil optimasi dilakukan perbandingan dengan parameter *Gas Turbine Generator* tanpa optimasi, dapat dilihat pada Tabel 4.7. Pada tabel tersebut dapat dibandingkan hasil kinerja Gas Turbine Generator sebelum dan setelah dilakukan optimasi.

Tabel 4. 7 Perbandingan hasil performansi sebelum dan setelah dilakukan optimasi



Sebelum optimisasi	Air Supply Pressure	PCD (P2)	Actual Fuel Flow	Generator Total kW	T1 Temperature	Gas Fuel Temp	Turbine Air Inlet DP	Air mass flow	Generator Capacity	Generator Efficiency	T5 Average Temperature	AFR
MIN	6.67	6.68	0.0775	283	14.9	35.2	11.3	0.670934	2856	0.8925	332	6.51041
MAX	7.39	7.53	0.242222	1673	33.2	62.1	12.9	2.447537	3127	0.9771875	488	19.08412
Setelah optimisasi	Air Supply Pressure	PCD (P2)	Actual Fuel Flow	Generator Total kW	T1 Temperature	Gas Fuel Temp	Turbine Air Inlet DP	Air mass flow	Generator Capacity	Generator Efficiency	T5 Average Temperature	AFR
Dengan data operasi yg diperlebar	6.8	6	0.4	1341	16.6	30.2	10.5	1.9	3.20E+03	1	440.4008	4.6885
Dengan konstrain output TS: (680 - 740)	7.1	7.4	0.1	2377.2	31	27.1	12.5	2.7	3.20E+03	1	695.015	24.7279
Dengan konstrain output Eff: 0.9 - 1, Generator Total KW: 2000 - 2800 KW dan AFR: 14-20	6.9	7	0.2	2567.3	20	54.9	11.3	2.2	3193.3	0.9916	409.9	19.8

Dari Tabel 4.7 dapat dilihat nilai parameter input yang dapat meningkatkan Generator Efficiency dan dengan perhitungan akan didapatkan nilai biaya yang bisa dihemat dengan penurunan pemakaian Fuel, sebelum dilakukan optimasi untuk pembebanan Generator sebesar 1673 kW membutuhkan fuel flow sebesar 0.178 kg/s, setelah dilakukan optimasi dengan pembebanan Generator 2377 kW membutuhkan fuel flow 0.1 kg/s maka ada potensi penghematan yang bisa didapat sekitar 0.078 kg/s atau 280.8 kg/h. Keuntungan secara ekonomi ini akan didapatkan apabila air mass flow bisa ditingkatkan dari 2.4 kg/s menjadi 2.7 kg/s dengan beberapa cara, yaitu:

- Menjaga temperature dan humidty Engine air inlet
- Pemakaian air filter yang sesuai rekomendasi OEM dan dijaga kualitasnya

Penurunan laju aliran udara (air mass flow rate) umumnya berbanding lurus dengan penurunan tekanan ambien yang disebabkan oleh kondisi saluran udara terhambat dikarenakan filter blocked. Untuk mengkondisikan agar proses pembakaran terjadi lebih sempurna, maka sistem pembakaran dibuat dengan variabel input yang sesuai hasil simulasi optimasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Adapun optimasi berikutnya dengan pembebanan Generator yang mencapai 2567.3 kW membutuhkan fuel flow sebesar 2 kg/s dengan Effisiensi 0.9916 dan T5 Temperature 409.9 oC (7410 oF) bisa didapatkan dengan air mass flow 2.2 kg/s yang bisa dicapai dengan kondisi normal operasi saat ini dengan persyaratan sebagai berikut:

- Menjaga input Gas Fuel Temperature di 54.9 deg F
- T1 (Air Inlet Temperature) diusahakan bisa mencapai 20 oC



#### 4.5 Perhitungan setelah dilakukan Optimasi

Tabel 4. 8 Data Operasi GTG-B

Input	Value	Unit
Design Capacity (W)	3.2	MW
Daya sebenarnya (W actual)	2377.3	KW
Laju aliran bahan bakar ( $\dot{m}_{bb}$ )	360	kg/h
Efisiensi generator	99.9	%
Temperatur masuk kompresor (T1)	304.15	K
Tekanan masuk kompresor (P1)	100.03	kPa
Temperatur keluar kompresor (T2)	593.636	K
Tekanan keluar kompresor (P2)	740	kPa
Temperatur keluar turbin (T4)	968.165	K
Tekanan keluar turbin (P4)(abs)	101.98	kPa
Specific heat combustion product	2.06008	KJ/Kg.K

##### 4.5.1 Properties untuk setiap state

###### a. State 1

Pada state ini udara dari luar (udara ruangan/atmosfir) masuk melalui inlet air filter menuju ke kompresor. Dari tabel operasi, didapatkan data yaitu:

$$T1 = 304.15 \text{ K}$$

$$P1 = 100,03 \text{ kPa}$$

Untuk mencari entalpi fluida kita menggunakan tabel termodinamika dari “Fundamental of Engineering Thermodynamics” 7th edition karangan Michael J. Moran dan Howard N. Saphiro pada bagian tabel A-22 Ideal Gas Properties of Air (terdapat pada lampiran). Besar enthalpy didapatkan dengan menggunakan proses interpolasi sehingga diperoleh:

$$h_1 = 304.369 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Dengan menggunakan rumus  $P_1V_1 = RT_1$ , dimana nilai R untuk konstanta gas universal nilainya sebagaimana ditentukan secara eksperimental adalah 8.314 kJ/kmol.K, maka besar  $V_1$  pada state 1 dapat dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$V_1 = \frac{RT_1}{MP_1}$$

Untuk mencari nilai M (*molecular weight*) udara kita menggunakan tabel termodinamika dari “Fundamental of Engineering Thermodynamics” 7th edition karangan Michael J. Moran dan Howard N. Saphiro pada bagian tabel A-1 (terdapat pada lampiran).

$$V_1 = \frac{RT_1}{MP_1}$$

$$V_1 = \frac{(8314 \frac{N.m}{kmol.K})(304.15 K)}{(28.97 \frac{kg}{kmol})(100,03 \times 10^3 \frac{N}{m^2})}$$

$$V_1 = 0.872 m^3/kg$$

b. State 2

Pada titik ini udara yang masuk ke kompresor akan dikompresikan keluar menuju ke ruang bakar, dimana fluida udara tersebut mempunyai tekanan dan temperatur yang tinggi. Dari tabel operasi, didapatkan data yaitu:

$$T_2 = 593.636 K$$

$$P_2 = 740 KPa$$

Untuk mencari entalpi fluida kita menggunakan tabel termodinamikadari “Fundamental of Engineering Thermodynamics” 7th edition karangan Michael J. Moran dan Howard N. Saphiro pada bagian tabel A-22 Ideal Gas Properties of Air (terdapat pada lampiran). Besar enthalpy didapatkan dengan menggunakan proses interpolasi sehingga diperoleh:

$$h_2 = 600.196 \frac{kJ}{kg}$$

Karena pada state 2 ini berlangsung proses kompresi isentropik maka:

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_{2s} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_{2s} = 304.15 \left(\frac{740}{100,03}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}$$

$$= 304.15 \times 1.771$$

$$= 538.649 \text{ K}$$

$$h_{2s} = 542.694 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Untuk menghitung  $V_2$  pada state 2 dapat digunakan cara sebagai berikut:

$$V_2 = \frac{RT_{2s}}{MP_2}$$

$$V_2 = \frac{(8314 \frac{\text{N.m}}{\text{kmol.K}})(538.649 \text{ K})}{(28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})(740 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2})}$$

$$V_2 = 0.208 \text{ m}^3/\text{kg}$$

#### c. State 3

Pada tahap ini terjadi proses pembakaran di dalam ruang bakar (*combustion chamber*) dan fluida bahan bakar natural gas diinjeksikan sehingga bercampur dengan udara dan terjadi proses pembakaran. Fuel gas yang sudah terbentuk dari pembakaran akan keluar dari ruang bakar menuju turbin.

Dari data Vendor didapatkan tekanan keluar kompresor dan tekanan keluar ruang bakar mengalami penurunan tekanan 2.5%, setelah nilai pressure drop diketahui, maka besar  $P_3$  dapat dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$\text{Pressure drop} = \frac{(P_2 - P_3)}{P_2}$$

$$0.025 = \frac{740 \text{ kPa} - P_3}{740 \text{ kPa}}$$

$$0.025 \times 740 \text{ kPa} = 740 \text{ kPa} - P_3$$

$$P_3 = 721.5 \text{ kPa}$$

Setelah didapatkan nilai  $P_3$ , serta dengan menggunakan nilai rasio spesifik,  $k=1,3$  seperti yang dicantumkan di Tabel 4.2 (sumber: Engineering Toolbox), maka temperatur masuk turbin dapat dicari dengan cara sebagai berikut:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left( \frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\begin{aligned}
T_3 &= T_4 \left( \frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} \\
&= 968.165 \text{ K} \left( \frac{721.5 \text{ kPa}}{101.98 \text{ kPa}} \right)^{\frac{1.3-1}{1.3}} \\
&= 968.165 \text{ K} \times 1.570 \\
&= 1520.683 \text{ K}
\end{aligned}$$

Dengan  $C_p \text{ combustion product} = 2.0600821 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$  dan  $h = C_p \times T_3$  maka:

$$\begin{aligned}
h_3 &= C_p \text{ combustion product} \times T_3 \\
&= 2.0600821 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times 1520.683 \text{ K} \\
&= 3132.733 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
\end{aligned}$$

Untuk menghitung  $V_3$  pada state 3 dapat digunakan cara sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
V_3 &= \frac{RT_3}{MP_3} \\
V_3 &= \frac{(8314 \frac{\text{N.m}}{\text{kmol.K}})(3132.733 \text{ K})}{(28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})(682.5 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2})} \\
V_3 &= 1.317 \text{ m}^3/\text{kg}
\end{aligned}$$

d. State 4

Pada state ini terjadi ekspansi gas buang hasil pembakaran dari dalam turbin. Pada proses ini terjadi gesekan antara gas hasil pembakaran dengan sudu-sudu turbin, sehingga temperatur gas buang yang keluar dari turbin menjadi lebih tinggi dari gas ideal (isentropis).

$$T_4 = 968.165 \text{ K}$$

$$P_4 = 101.98 \text{ kPa}$$

Dengan  $C_p \text{ combustion product} = 2.0600821 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$  dan  $h = C_p \times T_4$  maka:

$$\begin{aligned}
h_4 &= C_p \text{ combustion product} \times T_4 \\
&= 2.0600821 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times 968.165 \text{ K} \\
&= 1994.499 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
\end{aligned}$$

Karena pada state 4 ini berlangsung proses kompresi isentropis maka :

$$\begin{aligned}
 T_{4s} &= T_3 \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \\
 &= 3132.733 \text{ K} \left( \frac{101.98 \text{ kPa}}{682.5 \text{ kPa}} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} \\
 &= 3132.733 \text{ K} \times 0.580 \\
 &= 1816.985 \text{ K}
 \end{aligned}$$

Dengan  $C_p \text{ combustion product} = 2.0600821 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$  dan  $h = C_p \times T_{4s}$  maka:

$$\begin{aligned}
 h_{4s} &= C_p \text{ combustion product} \times T_{4s} \\
 &= 2.0600821 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times 1816.985 \text{ K} \\
 &= 3757.906 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

Untuk menghitung  $V_4$  pada state 4 dapat digunakan cara sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 V_4 &= \frac{RT_{4s}}{MP_4} \\
 V_4 &= \frac{(8314 \frac{\text{N.m}}{\text{kmol.K}})(1816.985 \text{ K})}{(28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})(101.98 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2})} \\
 V_4 &= 5.113 \text{ m}^3/\text{kg}
 \end{aligned}$$

#### 4.5.2 Perhitungan Performa Turbin Gas

Untuk perhitungan  $\dot{W}_{\text{kompressor}}$  kita menggunakan data-data properties pada generator. Perhitungan tersebut menggunakan persamaan:

$$\dot{W}_{\text{kompressor}} = \dot{m}_{\text{udara}} \times (h_2 - h_1)$$

Diperlukan hasil perhitungan dari  $\dot{m}_{\text{udara}}$  maka dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$\dot{m}_{\text{udara}} = \frac{A}{F} \times \dot{m}_{bb}$$

Berdasarkan data lapangan sudah diketahui massa bahan bakar (kg/s), maka tidak perlu digunakan formula diatas, maka harga dari  $\dot{m}_{bb}$  yaitu sebesar 464 kg/h

$$\dot{m}_{bb} = \frac{720 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} = 0.2 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$W_{nett} = (W_T - W_C)$$

Untuk menghitung Effisiensi Gas Turbin dapat digunakan cara berikut:

$$\begin{aligned} \eta_{turbin} &= \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \times 100\% \\ &= \frac{2181.065 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 1407.139 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{2181.065 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 1267.028 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \times 100\% \\ &= \frac{773.926 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{914.037 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \times 100\% \\ &= 84.67\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_{kompresor} &= \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \times 100\% \\ &= \frac{514.286 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 293.311 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{600.196 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 293.311 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \times 100\% \\ &= \frac{220.975 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{306.885 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \times 100\% \\ &= 72.005\% \end{aligned}$$

Perhitungan daya netto yang dihasilkan Turbin Gas adalah selisih antara daya yang dihasilkan turbin dengan daya yang dibutuhkan kompresor

$$W_{nett} = \left( (\dot{m}_{fuel \text{ gas}} + \dot{m}_{udara})(h_3 - h_4) \right) - \dot{m}_{udara}(h_2 - h_1)$$

$$W_{nett} = \left[1 + \left(\frac{A}{F}\right)\right] \dot{m}_{bb}(h_3 - h_4) - \left(\frac{A}{F}\right) \dot{m}_{bb}(h_2 - h_1)$$

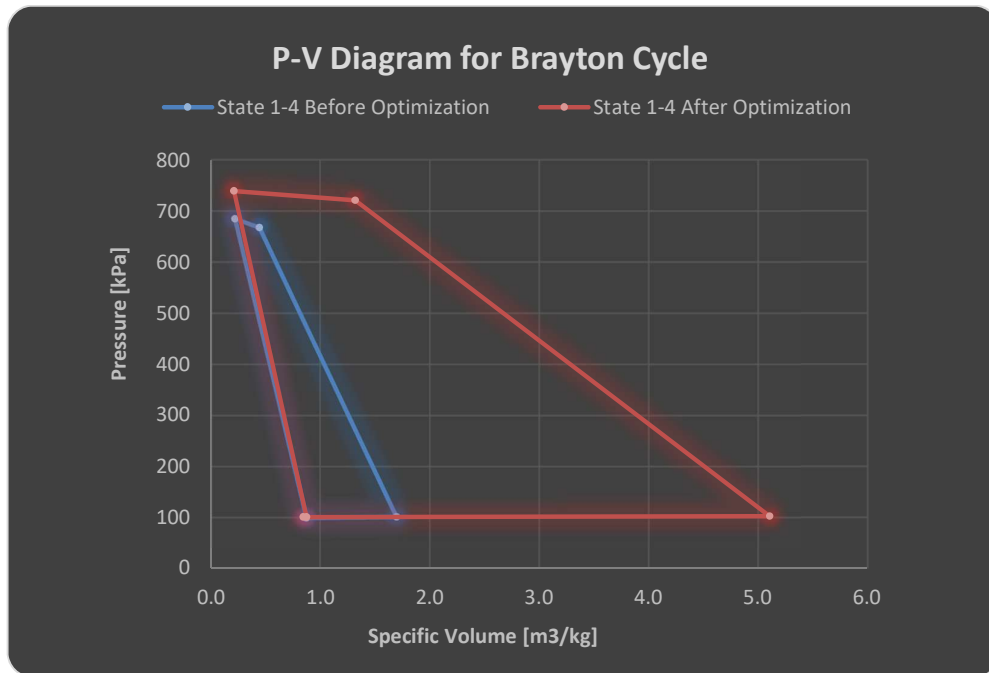
$$W_{nett} = [1 + 19.8] \times 0.2 \frac{kg}{s} \left(2181.065 \frac{kJ}{kg} - 1407.139 \frac{kJ}{kg}\right) - 19.8 \times 0.2 \frac{kg}{s} (600.196 \frac{kJ}{kg} - 293.311 \frac{kJ}{kg})$$

$$W_{nett} = 20.8 \times 0.2 \frac{kg}{s} \times 773.926 \frac{kJ}{kg} - 19.8 \times 0.2 \frac{kg}{s} \times 306.885 \frac{kJ}{kg}$$

$$W_{nett} = 3219.532 \frac{kJ}{s} - 1215.264 \frac{kJ}{s}$$

$$= 2004.268 \frac{kJ}{s}$$

Perbandingan kondisi State-1 sampai dengan State-4 pada *Gas Turbine Generator* dapat dilihat pada gambar 4.10. Pada gambar tersebut dapat dibandingkan diagram P-V Gas Turbine Generator sebelum dan setelah dilakukan optimasi.



Gambar 4. 11 Perbandingan diagram P-V Gas Turbine Generator

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil dan analisa data dari penelitian yang telah dilakukan, kesimpulan yang didapatkan adalah sebagai berikut:

- Hasil simulasi pemodelan *Gas Turbine Generator* sudah mewakili kondisi *real* di lapangan
- Penerapan *Artificial Intelligence* pada sistem *gas turbine generator* mampu menghasilkan gambaran input dan output dari suatu sistem GTG
- Penerapan GAO pada sistem *gas turbine generator* apabila diimplementasikan akan mampu menghemat biaya operasi hingga 280.8 kg/h
- Pembebanan Generator dapat di simulasikan mencapai 2567.3 kW dengan Efisiensi 99.16% dan T5 Temperature 409.9 °C (771.8 °F) bisa didapatkan dengan air mass flow 2.2 kg/s

#### **5.2 Saran**

Saran dari penelitian ini adalah:

1. Hasil dari penelitian ini dapat diimplementasikan di lapangan Offshore Pangkah sehingga Unit *Gas Turbine Generator* diharapkan dapat Running dengan peningkatan efisiensi dan pemakaian bahan bakar lebih hemat
2. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan menggunakan metode optimasi selain optimasi algoritma genetik untuk melihat apakah semua metode optimasi dapat memberikan hasil yang lebih baik.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Tony Giampaolo, MSME, *Gas Turbine Handbook: Principles and Practice 4th Edition*. 2009.
- [2] H. Asgari, X. Q. Chen, and R. Sainudiin, "Considerations in modelling and control of gas turbines - A review," *Proc. - 2011 2nd Int. Conf. Control. Instrum. Autom. ICCIA 2011*, pp. 84–89, 2011, doi: 10.1109/ICCIAutom.2011.6356635.
- [3] J. Chen and T. C. Huang, "Applying neural networks to on-line updated PID controllers for nonlinear process control," *J. Process Control*, vol. 14, no. 2, pp. 211–230, 2004, doi: 10.1016/S0959-1524(03)00039-8.
- [4] A. M. Y. Razak, *Industrial Gas Turbine Performance and Operability*. 2007.
- [5] F. R. Martínez, A. R. Martínez, M. T. Velazquez, P. Q. Diez, G. T. Eslava, and J. A. Francis, "Evaluation of the Gas Turbine Inlet Temperature with Relation to the Excess Air," *Energy Power Eng.*, vol. 03, no. 04, pp. 517–524, 2011, doi: 10.4236/epe.2011.34063.
- [6] (2003) Engineering ToolBox, "Combustion Efficiency and Excess Air," *Combustion Efficiency and Excess Air.*, 2003.  
[https://www.engineeringtoolbox.com/boiler-combustion-efficiency-d\\_271.html](https://www.engineeringtoolbox.com/boiler-combustion-efficiency-d_271.html).
- [7] L. Lennart and G. Torkel, *Modeling of Dynamic Systems*. PTR Prentice Hall, 1994.
- [8] W. P. J. Visser, O. Kogenhop, and M. Oostveen, "A generic approach for gas turbine adaptive modeling," no. October, 2004.
- [9] W. I. Rowen, "Simplified Mathematical Representations of Heavy-Duty Gas Turbines.," *Am. Soc. Mech. Eng.*, vol. 105, no. 83, pp. 865–869, 1983.
- [10] W. I. Rowen, "Simplified mathematical representations of single shaft gas turbines in mechanical drive service," *Turbomach. Int.*, vol. 33, no. 5, pp. 26–32, 1992, doi: 10.1115/92-gt-022.
- [11] N. Chiras, C. Evans, and D. Rees, "Global nonlinear modeling of gas turbine dynamics using NARMAX structures," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 124, no. 4, pp. 817–826, 2002, doi: 10.1115/1.1470483.
- [12] A. Lazzaretto and A. Toffolo, "Analytical and neural network models for gas turbine design and off-design simulation," *Int. J. Appl. Thermodyn.*, vol. 4, no. 4, pp. 173–182, 2001, doi: 10.5541/ijot.78.

- [13] N. Chiras, C. Evans, and D. Rees, "Nonlinear Modelling and Validation of an Aircraft Gas Turbine Engine," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 34, no. 6, pp. 871–876, 2001, doi: 10.1016/s1474-6670(17)35289-8.
- [14] N. Chiras, C. Evans, and D. Rees, "Nonlinear gas turbine modeling using feedforward neural networks," *Am. Soc. Mech. Eng. Int. Gas Turbine Institute, Turbo Expo IGTI*, vol. 2 A, pp. 145–152, 2002, doi: 10.1115/GT2002-30035.
- [15] M. Jelali and A. Kroll, *Hydraulic Servo-systems: Modelling, Identification and Control*. 2006.
- [16] M. Nørgaard, O. Ravn, and N. K. P. and L. K. Hansen, *Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems*, 2nd editio. 2000.
- [17] N. Comput, A. S. Park, and I. T. Nabney, "Neural Network Control of a Gas Turbine," pp. 198–208, 1996.
- [18] N. Dodd and J. Martin, "Using neural networks to optimise gas turbine aero engines," *Comput. Control Eng. J.*, vol. 8, no. 3, pp. 129–135, 1997, doi: 10.1049/cce:19970305.
- [19] T. R. Biyanto, "Algoritma Genetika untuk Mengoptimasi Konsumsi Energi pada Proses Kolom Distilasi Metanol-Air," *J. Tek. Elektro*, vol. 7, no. 1, 2007, doi: 10.9744/jte.7.1.43-49.
- [20] H. Demuth, "Neural Network Toolbox Documentation," *NN with Matlab*, p. 846, 2004.
- [21] M. Mitchell, *Introduction to Genetic Algorithms*. 1996.
- [22] (2003) Engineering ToolBox, "Specific Heat and Individual Gas Constant of Gases," 2003. [https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-gases-d\\_159.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-gases-d_159.html) .
- [23] T. Dolar and A. Serikat, "Pemodelan jaringan syaraf tiruan dengan algoritma one step secant backpropagation dalam return kurs rupiah terhadap dolar amerika serikat," vol. 6, pp. 61–70, 2017.

## LAMPIRAN 1

### Lampiran 1. Koding ANN

```
clc
close all;
clear all;
clc
disp('-----')
disp('  TRAINING IN PROGRESS  ')
disp('-----')
% A = xlsread('Air to Fuel Ratio GTG-B r
3.xlsx','GTG-B');
load B.mat
[rowTr,colTr] = size(A);
% break

ut = A(4:7000,1:11)';
yt = A(4:7000,12)';

uv  = A(7001:8000,1:11)';
yv  = A(7001:8000,12)';

us = A(4:8000,1:11)';
ys = A(4:8000,12)';

[rowv,colv] = size(uv);
[rowu,colu] = size(ut);
[rowy,coly] = size(yt);
Min = -ones(rowu,1);
Max = ones(rowu,1);
MM = [Min Max];

for i=1:rowu
maxus(i)=max(us(i,:)); %change the range
minus(i)=min(us(i,:));
end

for i = 1:rowy
maxys(i)=max(ys(i,:));
minys(i)=min(ys(i,:));
end

minmaxus = [maxus;minus];
minmaxys = [maxys;minys];
```

```

for i = 1:rowy
yt(i,:)=((2/(max(ys(i,:))-min(ys(i,:))))*(yt(i,:)-
min(ys(i,:))))-1;
yv(i,:)=((2/(max(ys(i,:))-min(ys(i,:))))*(yv(i,:)-
min(ys(i,:))))-1;
% ut(i,j)=((2/(maxus(i)-minus(i)))*(ut(i,j)-
minus(i))))-1;
end

for j = 1:colu
for i=1:rowu
ut(i,j)=((2/(maxus(i)-minus(i)))*(ut(i,j)-
minus(i))))-1;
end
end

for j = 1:colv
for i=1:rowv
uv(i,j)=((2/(maxus(i)-minus(i)))*(uv(i,j)-
minus(i))))-1;
end
end

ut1=ut(1,:);
ut2=ut(2,:);
ut3=ut(3,:);
ut4=ut(4,:);
ut5=ut(5,:);
ut6=ut(6,:);
ut7=ut(7,:);
ut8=ut(8,:);
ut9=ut(9,:);
ut10=ut(10,:);
ut11=ut(11,:);
% ut12=ut(12,:);
% ut13=ut(13,:);
% ut14=ut(14,:);
% ut15=ut(15,:);
% ut16=ut(16,:);
% ut17=ut(17,:);
% ut18=ut(18,:);
% ut19=ut(19,:);

```

```

yt1 = yt(1,:)';
% yt2 = yt(2,:)';
% yt3 = yt(3,:)';
% yt4 = yt(4,:)';
% yt5 = yt(5,:)';

uv1=uv(1,:)';
uv2=uv(2,:)';
uv3=uv(3,:)';
uv4=uv(4,:)';
uv5=uv(5,:)';
uv6=uv(6,:)';
uv7=uv(7,:)';
uv8=uv(8,:)';
uv9=uv(9,:)';
uv10=uv(10,:)';
uv11=uv(11,:)';
% uv12=uv(12,:)';
% uv13=uv(13,:)';
% uv14=uv(14,:)';
% uv15=uv(15,:)';
% uv16=uv(16,:)';
% uv17=uv(17,:)';
% uv18=uv(18,:)';
% uv19=uv(19,:)';

yv1 = yv(1,:)';
% yv2 = yv(2,:)';
% yv3 = yv(3,:)';
% yv4 = yv(4,:)';
% yv5 = yv(5,:)';
% history length for MIMO identification
hist = ones(1,11);
% hist = [1 1 1 1 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1];

[n_rows,n_col] = size(ut1);

% setting training data matrix
data_latih = zeros(n_rows-1,sum(hist));

for i = 1:hist(1),
    data_latih(:,i) = [zeros(hist(1)-
i,1);ut1(2:n_rows-hist(1)+i)];
end

```

```

for j = 1:hist(2),
    data_latih(:,sum(hist(1))+j) = [zeros(hist(2)-
j,1);ut2(2:n_rows-hist(2)+j)];
end

for k = 1:hist(3),
    data_latih(:,sum(hist(1:2))+k) =
[zeros(hist(3)-k,1);ut3(2:n_rows-hist(3)+k)];
end
for l = 1:hist(4),
    data_latih(:,sum(hist(1:3))+l) =
[zeros(hist(4)-l,1);ut4(2:n_rows-hist(4)+l)];
end

for m = 1:hist(5),
    data_latih(:,sum(hist(1:4))+m) =
[zeros(hist(5)-m,1);ut5(2:n_rows-hist(5)+m)];
end

for n = 1:hist(6),
    data_latih(:,sum(hist(1:5))+n) =
[zeros(hist(6)-n,1);ut6(2:n_rows-hist(6)+n)];
end

for o = 1:hist(7),
    data_latih(:,sum(hist(1:6))+o) =
[zeros(hist(7)-o,1);ut7(2:n_rows-hist(7)+o)];
end

for p = 1:hist(8),
    data_latih(:,sum(hist(1:7))+p) =
[zeros(hist(8)-p,1);ut8(2:n_rows-hist(8)+p)];
end

for q = 1:hist(9),
    data_latih(:,sum(hist(1:8))+q) =
[zeros(hist(9)-q,1);ut9(2:n_rows-hist(9)+q)];
end
for r = 1:hist(10),
    data_latih(:,sum(hist(1:9))+r) =
[zeros(hist(10)-r,1);ut10(2:n_rows-hist(10)+r)];
end
for s = 1:hist(11),
    data_latih(:,sum(hist(1:10))+s) =
[zeros(hist(11)-s,1);ut11(2:n_rows-hist(11)+s)];

```

```

end
% for t = 1:hist(12),
%     data_latih(:,sum(hist(1:11))+t) =
[zeros(hist(12)-t,1);ut12(2:n_rows-hist(12)+t)];
% end
% for u = 1:hist(13),
%     data_latih(:,sum(hist(1:12))+u) =
[zeros(hist(13)-u,1);ut13(2:n_rows-hist(13)+u)];
% end
% for v = 1:hist(14),
%     data_latih(:,sum(hist(1:13))+v) =
[zeros(hist(14)-v,1);ut14(2:n_rows-hist(14)+v)];
% end
%
% for w = 1:hist(15),
%     data_latih(:,sum(hist(1:14))+w) =
[zeros(hist(15)-w,1);ut15(2:n_rows-hist(15)+w)];
% end
%
% for x = 1:hist(16),
%     data_latih(:,sum(hist(1:15))+x) =
[zeros(hist(16)-x,1);ut16(2:n_rows-hist(16)+x)];
% end
%
% for y = 1:hist(17),
%     data_latih(:,sum(hist(1:16))+y) =
[zeros(hist(17)-y,1);ut17(2:n_rows-hist(17)+y)];
% end
%
% for z = 1:hist(18),
%     data_latih(:,sum(hist(1:17))+z) =
[zeros(hist(18)-z,1);ut18(2:n_rows-hist(18)+z)];
% end
%
% for a = 1:hist(19),
%     data_latih(:,sum(hist(1:18))+a) =
[zeros(hist(19)-a,1);ut19(2:n_rows-hist(19)+a)];
% end
%
% for w = 1:hist(15),
%     data_latih(:,sum(hist(1:14))+w) =
[zeros(hist(15)-w,1);yt2(1:n_rows-1-hist(15)+w)];
% end
%
% for x = 1:hist(16),

```

```

%     data_latih(:,sum(hist(1:15))+x) =
[zeros(hist(16)-x,1);yt3(1:n_rows-1-hist(16)+x)];
% end
%
%
% for y = 1:hist(17),
%     data_latih(:,sum(hist(1:16))+x) =
[zeros(hist(17)-x,1);yt3(1:n_rows-1-hist(16)+x)];
% end
%
%
% for x = 1:hist(16),
%     data_latih(:,sum(hist(1:15))+x) =
[zeros(hist(16)-x,1);yt3(1:n_rows-1-hist(16)+x)];
% end

%
% for x = 1:hist(16),
%     data_latih(:,sum(hist(1:15))+x) =
[zeros(hist(16)-x,1);yt3(1:n_rows-1-hist(16)+x)];
% end

PHI = data_latih';

% Construction of output matrix
Y = zeros(n_rows-1,rowy);
Y(:,1) = yt1(2:end);
% Y(:,2) = yt2(2:end);
% Y(:,3) = yt3(2:end);
% Y(:,4) = yt4(2:end);
% Y(:,5) = yt5(2:end);

Ys = Y';

% Construction of networks structure
NetDef = [];
netdef1 = 'H';
netdef2 = 'L';
L = [netdef1;netdef2];
Data_RMSE =[];
trparms = settrain;
% i = 5
for i = 1:50 %20:30 %1 = 3, 15 = 18
hn = i

```



```

close all;
Ys = Y'
    NetDef = [NetDef L]
    netdef1 = 'H';
    netdef2 = '-';
    L = [netdef1;netdef2];

% Construction of networks structure

% NetDef = ['HHHHHHHHHHHHHHHHHH';'LLLL-----
'];
trparms = settrain;

[W1,W2,PI_vec,yhat] =
marq_rev(NetDef,[],[],PHI,Ys,trparms);
% RMSE calculation
% yhat = round(yhat);
for i = 1:rowy
RMSE_train(i)=r_m_s_e(yhat(i,:),Ys(i,:))
end

for i = 1:rowy
Ys(i,:)=(((max(ys(i,:))-
min(ys(i,:))))*(Ys(i,:)+1)/2)+min(ys(i,:));
%Descaling
Yhat(i,:)=(((max(ys(i,:))-
min(ys(i,:))))*(yhat(i,:)+1)/2)+min(ys(i,:));
%Descaling
RMSE_train_f(i) = r_m_s_e(Ys(i,:),Yhat(i,:));
end

%Drawing
for i = 1
figure(i)
plot(Ys(i,:), 'b-');
hold on
plot(Yhat(i,:), 'r.', 'LineWidth',1);
grid
title('Network Training ');
legend('Solid : Actual','Dot : Predicted ',
'Location','Best');
ylabel('Efficiency Generator (%)');
xlabel('Data Set');
end

```

```

%
% for i = 2
% figure(i)
% plot(Ys(i,:), 'b-');
% hold on
% plot(Yhat(i,:), 'r.', 'LineWidth', 1);
% grid
% title('Network Training ');
% legend('Solid : Actual', 'Dot : Predicted ',
'Location', 'Best');
% ylabel('Efficiency Generator (%)');
% xlabel('Data Set');
% end
%
% for i = 3
% figure(i)
% plot(Ys(i,:), 'b-');
% hold on
% plot(Yhat(i,:), 'r.', 'LineWidth', 1);
% grid
% title('Network Training ');
% legend('Solid : Actual', 'Dot : Predicted ',
'Location', 'Best');
% ylabel('T5 Average Temperature (°C)');
% xlabel('Data Set');
% end

% for i = 4
% figure(i)
% plot(Ys(i,:), 'b-');
% hold on
% plot(Yhat(i,:), 'r.', 'LineWidth', 1);
% grid
% title('Network Training ');
% legend('Solid : Actual', 'Dot : Predicted ',
'Location', 'Best');
% ylabel('Spin reverse(KW)');
% xlabel('Data Set');
% end

% for i = 5
% figure(i)
% plot(Ys(i,:), 'b-');
% hold on
% plot(Yhat(i,:), 'r.', 'LineWidth', 1);

```

```

% grid
% title('Network Training ');
% legend('Solid : Actual','Dot : Predicted ',
'Location','Best');
% ylabel('T5 Average Temperature (°C)');
% xlabel('Data Set');
% end

save WTGTGBO1 NetDef W1 W2

% xlswrite('E1105Weight', W1, 'W1')
% xlswrite('E1105Weight', W2, 'W2')
% break
% Tahap Validasi
disp('-----')
disp(' VALIDATION IN PROGRESS ')
disp('-----')

[n_rows,n_col] = size(uv1);
data_uji = zeros(n_rows-1,sum(hist));

for i = 1:hist(1),
    data_uji(:,i) = [zeros(hist(1)-
i,1);uv1(2:n_rows-hist(1)+i)];
end

for j = 1:hist(2),
    data_uji(:,sum(hist(1))+j) = [zeros(hist(2)-
j,1);uv2(2:n_rows-hist(2)+j)];
end

for k = 1:hist(3),
    data_uji(:,sum(hist(1:2))+k) = [zeros(hist(3)-
k,1);uv3(2:n_rows-hist(3)+k)];
end
for l = 1:hist(4),
    data_uji(:,sum(hist(1:3))+l) = [zeros(hist(4)-
l,1);uv4(2:n_rows-hist(4)+l)];
end

for m = 1:hist(5),
    data_uji(:,sum(hist(1:4))+m) = [zeros(hist(5)-
m,1);uv5(2:n_rows-hist(5)+m)];
end

```

```

for n = 1:hist(6),
    data_uji(:,sum(hist(1:5))+n) = [zeros(hist(6)-
n,1);uv6(2:n_rows-hist(6)+n)];
end

for o = 1:hist(7),
    data_uji(:,sum(hist(1:6))+o) = [zeros(hist(7)-
o,1);uv7(2:n_rows-hist(7)+o)];
end

for p = 1:hist(8),
    data_uji(:,sum(hist(1:7))+p) = [zeros(hist(8)-
p,1);uv8(2:n_rows-hist(8)+p)];
end

for q = 1:hist(9),
    data_uji(:,sum(hist(1:8))+q) = [zeros(hist(9)-
q,1);uv9(2:n_rows-hist(9)+q)];
end
for r = 1:hist(10),
    data_uji(:,sum(hist(1:9))+r) = [zeros(hist(10)-
r,1);uv10(2:n_rows-hist(10)+r)];
end
for s = 1:hist(11),
    data_uji(:,sum(hist(1:10))+s) =
[zeros(hist(11)-s,1);uv11(2:n_rows-hist(11)+s)];
end
% for t = 1:hist(12),
%     data_uji(:,sum(hist(1:11))+t) =
% [zeros(hist(12)-t,1);uv12(2:n_rows-hist(12)+t)];
% end
% for u = 1:hist(13),
%     data_uji(:,sum(hist(1:12))+u) =
% [zeros(hist(13)-u,1);uv13(2:n_rows-hist(13)+u)];
% end
% for v = 1:hist(14),
%     data_uji(:,sum(hist(1:13))+v) =
% [zeros(hist(14)-v,1);uv14(2:n_rows-hist(14)+v)];
% end
%
% for w = 1:hist(15),
%     data_uji(:,sum(hist(1:14))+w) =
% [zeros(hist(15)-w,1);uv15(2:n_rows-hist(15)+w)];
% end
%

```

```

% for x = 1:hist(16),
%     data_uji(:,sum(hist(1:15))+x) =
[zeros(hist(16)-x,1);uv16(2:n_rows-hist(16)+x)];
% end
%
% for y = 1:hist(17),
%     data_uji(:,sum(hist(1:16))+y) =
[zeros(hist(17)-y,1);uv17(2:n_rows-hist(17)+y)];
% end
%
% for z = 1:hist(18),
%     data_uji(:,sum(hist(1:17))+z) =
[zeros(hist(18)-z,1);uv18(2:n_rows-hist(18)+z)];
% end
%
% for a = 1:hist(19),
%     data_uji(:,sum(hist(1:18))+a) =
[zeros(hist(19)-a,1);uv19(2:n_rows-hist(19)+a)];
% end

PHI_uji = data_uji';

Y_uji = zeros(n_rows-1,rowy);
Y_uji(:,1) = yv1(2:end);
% Y_uji(:,2) = yv2(2:end);
% Y_uji(:,3) = yv3(2:end);
% Y_uji(:,4) = yv4(2:end);
% Y_uji(:,5) = yv5(2:end);

Ys_uji = Y_uji';

[y2_uji]=marq_rev_uji(NetDef,W1,W2,PHI_uji,Ys_uji)
;
% y2_uji = round(y2_uji);

% RMSE calculation
for i = 1:rowy
RMSE_test(i)=r_m_s_e(Ys_uji(i,:),y2_uji(i,:))
end

for i = 1:rowy
Ys_test(i,:)=(((max(ys(i,:))-
min(ys(i,:))))*(Ys_uji(i,:)+1)/2)+min(ys(i,:)));
%Descaling

```

```

Yhat_test(i,:)=((max(ys(i,:))-
min(ys(i,:))))*(y2_uji(i,:)+1)/2)+min(ys(i,:));
%Descaling
RMSE_test_f(i) =
r_m_s_e(Ys_test(i,:),Yhat_test(i,:));
end

%Drawing
for i = 1
figure(i+rowy)
plot(Ys_test(i,:), 'k-');
hold on
plot(Yhat_test(i,:), 'r.', 'LineWidth',1);
grid
title('Network Validation ');
legend('Solid : Actual', 'Dot : Predicted ',
'Location', 'Best');
ylabel('Efficiency Generator (%)');
xlabel('Data Set');
end
%
%
% for i = 2
% figure(i+rowy)
% plot(Ys_test(i,:), 'k-');
% hold on
% plot(Yhat_test(i,:), 'r.', 'LineWidth',1);
% grid
% title('Network Validation ');
% legend('Solid : Actual', 'Dot : Predicted ',
'Location', 'Best');
% ylabel('Efficiency Generator (%)');
% xlabel('Data Set');
% end
%
% for i = 3
% figure(i+rowy)
% plot(Ys_test(i,:), 'k-');
% hold on
% plot(Yhat_test(i,:), 'r.', 'LineWidth',1);
% grid
% title('Network Validation ');
% legend('Solid : Actual', 'Dot : Predicted ',
'Location', 'Best');
% ylabel('T5 Average Temperature (°C)');

```

```

% xlabel('Data Set');
% end

% for i = 4
% figure(i+rowy)
% plot(Ys_test(i,:), 'k-');
% hold on
% plot(Yhat_test(i,:), 'r.', 'LineWidth', 1);
% grid
% title('Network Validation ');
% legend('Solid : Actual', 'Dot : Predicted ',
'Location', 'Best');
% ylabel('Spin reverse(kW)');
% xlabel('Data Set');
% end
%

% for i = 5
% figure(i+3)
% plot(Ys_test(i,:), 'k-');
% hold on
% plot(Yhat_test(i,:), 'r.', 'LineWidth', 1);
% grid
% title('Network Validation ');
% legend('Solid : Actual', 'Dot : Predicted ',
'Location', 'Best');
% ylabel('Efficiency Generator (%)');
% xlabel('Data Set');
% end

%=====
=====
RMSE_iterasi = [RMSE_train RMSE_test RMSE_train_f
RMSE_test_f ];
Data_RMSE = [Data_RMSE; RMSE_iterasi]

end
xlswrite('RMSEGTGB01.xlsx', Data_RMSE, 'data')

% save E1101_RMSEfind RMSE_train RMSE_test
RMSE_train_f RMSE_test_f

```

```

% averageRMSET =
(Data_RMSE(:,1)+Data_RMSE(:,2)+Data_RMSE(:,3)+Data
_RMSE(:,4))/rowy
% averageRMSEV =
(Data_RMSE(:,rowy+1)+Data_RMSE(:,rowy+2)+Data_RMSE
(:,rowy+3)+Data_RMSE(:,rowy+4))/rowy

averageRMSET = (Data_RMSE(:,1))/rowy
averageRMSEV = (Data_RMSE(:,rowy+1))/rowy

figure(rowy*2+1)
plot(averageRMSET, 'k-');
hold on
plot(averageRMSEV, 'r-', 'LineWidth', 1);
grid
title('RMSE GTGB');
legend('Black : RMSE Training', 'Red : RMSE
Validation ', 'Location', 'Best');
ylabel('RMSE');
xlabel('Hidden node');

```



## LAMPIRAN 2

### Lampiran 2. Koding *Genetic Algorithm*

```
%Pembangkitan Populasi dan Parameter
global yt1 u1 u2 u3 u4 u5 u6 u7 u8 u9 u10 u11

Npop      = 100;           %populasi
Maxit     = 200;           %iterasi
el        = 0.05;          %elatism
Pc        = 0.9;           %probabilitas
crossover

Pm        = 0.2;           %probabilitas
mutasi

Nvar      = 11;            %jumlah
variabel desain yang dioptimasi
Nbit      = 40;            %jumlah bit
%Constrain
% T5 Average Temp bukan di 740 - 760 deg C
%Air Supply Pressure, PCD (P1), Actual Fuel Flow,
Generator Total kW, T1
%Temperature, Gas Fuel Temp, Turbine Air Inlet
DP, Air mass flow, Generator Capacity (Calc
Est), Generator Efficiency, T5 Average
Temperature,
%      6.9841      7.0141      0.1506  399.5899
15.0106  50.7510  11.7354      1.0223
%      6.6835      7.5064      0.1897      524.9594
15.0184 48.9907  11.5034      2.1905
%      u1      u2      u3      u4
u5      u6      u7      u8      u9      u10
u11
rb = [ 6.67      6.68      0.0775      2500
14.9      35.2      11.3      0.670933948 3100  740
14]; %2856 89% 332
ra = [ 7.39      7.53      0.242222222 2800
33.2      62.1      12.9      2.447537181 3200  760
20]; % 3127 98% 488
%
% 2856 332 6.510410281
% 3127 488 19.08411649

% rb = [5.95      5.83      0      0      0      8.3 9.7 0];
% ra = [8.11      8.38      0.406944444 3063      51.5
89 14.5      4.224140413];
```

```

% rb      = [0 0 0 0 0 0 0 0 0];
% ra      = [100 10 1000 2000 100 100 100
999999];
% 0.670933948
% 2.447537181

% 2856 89% 332
% 3127 98% 488

% rb      = [0.6 0.0127 5];          %batas bawah
cari constraint x4 x5 DICARI!!!!
% ra      = [0.9 0.02224 7];        %batas atas cari
constraint x4 x5 DICARI!!!!

eBangkit   = [];
Individu   = [];
eIndividu  = [];
david      = [];
Dadatfit   = [];
Datfit     = [];
summary    = [];
eDadatfit  = [];
efitnessmax = [];
eIndividuMax = [];

Bangkit = round(rand(Npop,Nbit*Nvar));
popsize = size(Bangkit,1);

for i = 1:Nvar
    batas(i) = ra(i)-rb(i);
end
for i =1:Npop
    for j = 1:Nvar
        Desimal(i,j) = bi2de(Bangkit(i,((j*Nbit)-(Nbit-1)): (j*Nbit)), 'left-msb');
        Individu(i,j) = (Desimal(i,j)*batas(:,j)-batas(:,j)+rb(:,j)*(2^Nbit-1))/(2^Nbit-1);
    end
end

Datfit = [];
variabel = [];
for i = 1:size(Individu,4)
    fitness = integrationGTGB1(Individu(i,:));
    Datfit = [Datfit;fitness];
end

```

```

        [fitemax,nmax]=max(Datfit);
end

Dadatfit = [];
for generasi=1:Maxit
    disp('GA processing')
    clear command windows
    clear command history
    clear memory
    generasi
        if generasi > 1
            sort_fit = sortrows(sort,Nbit*Nvar+1);
            Individul = sort_fit(round((1-
el)*Npop+1):Npop,:);
            remain =
sort_fit(round(el*Npop)+1:Npop,:);

            X = Individul;
            M = size(X,1);

            sumfitness = sum(Datfit);
            for i=1:M
                Prob(i) = Datfit(i)/sumfitness;
            end
            for i=2:M
                Prob(i) = Prob(i)+Prob(i-1);
            end
            for i=1:M
                n=rand;
                k=1;
                for j=1:M-1
                    if (n>Prob(j))
                        k=j+1;
                    end
                end
                Xparents(i,:) = X(k,:);
            end

%Crossover
            [M,d] = size(Xparents);
            Xcrossed = Xparents;
            for i=1:2:M-1
                c=rand;
                if (c<=Pc)
                    p=ceil((d-1)*rand);

```

```

        Xcrossed(i,:) = [Xparents(i,1:p)
Xparents(i+1,p+1:d)];
        Xcrossed(i+1,:) =
[Xparents(i+1,1:p) Xparents(i,p+1:d)];
    end
end
if (M/2~=floor(M/2))
    c=rand;
    if (c<=Pc)
        p=ceil((d-1)*rand);
        str=ceil((M-1)*rand);
        Xcrossed(M,:) = [Xparents(M,1:p)
Xparents(str,p+1:d)]; %the first child is chosen
    end
end

%Mutasi
[M,d] = size(Xcrossed);
Xnew=Xcrossed;
for i=1:M
    for j=1:d
        p=rand;
        if (p<=Pm)
            Xnew(i,j)=1-Xcrossed(i,j);
        end
    end
end

disp('New fitness calculation');

Bangkit =
[Xnew(:,1:Nbit*Nvar);remain(:,1:Nbit*Nvar)];
end
eBangkit = [eBangkit; Bangkit];

for i =1:Npop
    for j = 1:Nvar;
        Desimal(i,j) =
bi2de(Bangkit(i,((j*Nbit)-(Nbit-
1)):(j*Nbit)), 'left-msb');
        Individu(i,j) =
(Desimal(i,j)*batas(:,j)-
batas(:,j)+rb(:,j)*(2^Nbit-1))/(2^Nbit-1);
    end
end
end

```

```

Datfit = [];
for i = 1:Npop
    fitness = integrationGTGB1(Individu(i,:));
    Datfit = [Datfit;fitness];
    [fitemax,nmax] = max(Datfit);
end
% AFR
% TRB = [ AFR yt1 yt2 yt3]
Dadatfit = Datfit;
eDadatfit = [eDadatfit;Dadatfit];
eIndividu = [eIndividu;Individu];
[fitnessmax,nmax] = max(eDadatfit);
efitnessmax = [efitnessmax;fitnessmax];
BangkitMax = eBangkit(nmax,:);
IndividuMax = eIndividu(nmax,:);
eIndividuMax = [eIndividuMax;IndividuMax];
BangkitMaxlast = BangkitMax;
schedmax = BangkitMax;
sort = [Bangkit Dadatfit];
summary = [summary; sort];
david = [david; Dadatfit];

clc
Optimum_variable_design=eIndividuMax(1,:)
Optimum_objective_function=fitness(1,:)
% yt1
% yt2
% yt3
% yt4

% AFR = eIndividuMax(1,8)/eIndividuMax(1,3)

figure(gcf)
title('Grafik Fitness GA selama
Iterasi','color','b')
xlabel('Iterasi')
ylabel('Efisiensi (0-1)')
hold on
plot(efitnessmax, 'DisplayName', 'efitnessmax',
'YDataSource', 'efitnessmax');
hold on
end

```

## LAMPIRAN 3

**TABLE A-22**

**Ideal Gas Properties of Air**

T(K), h and u(kJ/kg), s° (kJ/kg · K)											
				when Δs = 0 <sup>1</sup>						when Δs = 0	
T	h	u	s°	p <sub>r</sub>	v <sub>r</sub>	T	h	u	s°	p <sub>r</sub>	v <sub>r</sub>
200	199.97	142.56	1.29559	0.3363	1707.	450	451.80	322.62	2.11161	5.775	223.6
210	209.97	149.69	1.34444	0.3987	1512.	460	462.02	329.97	2.13407	6.245	211.4
220	219.97	156.82	1.39105	0.4690	1346.	470	472.24	337.32	2.15604	6.742	200.1
230	230.02	164.00	1.43557	0.5477	1205.	480	482.49	344.70	2.17760	7.268	189.5
240	240.02	171.13	1.47824	0.6355	1084.	490	492.74	352.08	2.19876	7.824	179.7
250	250.05	178.28	1.51917	0.7329	979.	500	503.02	359.49	2.21952	8.411	170.6
260	260.09	185.45	1.55848	0.8405	887.8	510	513.32	366.92	2.23993	9.031	162.1
270	270.11	192.60	1.59634	0.9590	808.0	520	523.63	374.36	2.25997	9.684	154.1
280	280.13	199.75	1.63279	1.0889	738.0	530	533.98	381.84	2.27967	10.37	146.7
285	285.14	203.33	1.65055	1.1584	706.1	540	544.35	389.34	2.29906	11.10	139.7
290	290.16	206.91	1.66802	1.2311	676.1	550	554.74	396.86	2.31809	11.86	133.1
295	295.17	210.49	1.68515	1.3068	647.9	560	565.17	404.42	2.33685	12.66	127.0
300	300.19	214.07	1.70203	1.3860	621.2	570	575.59	411.97	2.35531	13.50	121.2
305	305.22	217.67	1.71865	1.4686	596.0	580	586.04	419.55	2.37348	14.38	115.7
310	310.24	221.25	1.73498	1.5546	572.3	590	596.52	427.15	2.39140	15.31	110.6
315	315.27	224.85	1.75106	1.6442	549.8	600	607.02	434.78	2.40902	16.28	105.8
320	320.29	228.42	1.76690	1.7375	528.6	610	617.53	442.42	2.42644	17.30	101.2
325	325.31	232.02	1.78249	1.8345	508.4	620	628.07	450.09	2.44356	18.36	96.92
330	330.34	235.61	1.79783	1.9352	489.4	630	638.63	457.78	2.46048	19.84	92.84
340	340.42	242.82	1.82790	2.149	454.1	640	649.22	465.50	2.47716	20.64	88.99
350	350.49	250.02	1.85708	2.379	422.2	650	659.84	473.25	2.49364	21.86	85.34
360	360.58	257.24	1.88543	2.626	393.4	660	670.47	481.01	2.50985	23.13	81.89
370	370.67	264.46	1.91313	2.892	367.2	670	681.14	488.81	2.52589	24.46	78.61
380	380.77	271.69	1.94001	3.176	343.4	680	691.82	496.62	2.54175	25.85	75.50
390	390.88	278.93	1.96633	3.481	321.5	690	702.52	504.45	2.55731	27.29	72.56
400	400.98	286.16	1.99194	3.806	301.6	700	713.27	512.33	2.57277	28.80	69.76
410	411.12	293.43	2.01699	4.153	283.3	710	724.04	520.23	2.58810	30.38	67.07
420	421.26	300.69	2.04142	4.522	266.6	720	734.82	528.14	2.60319	32.02	64.53
430	431.43	307.99	2.06533	4.915	251.1	730	745.62	536.07	2.61803	33.72	62.13
440	441.61	315.30	2.08870	5.332	236.8	740	756.44	544.02	2.63280	35.50	59.82

1.  $p_r$  and  $v_r$  data for use with Eqs. 6.41 and 6.42, respectively.

### LAMPIRAN 3 (Lanjutan)

**TABLE A-1**

Atomic or Molecular Weights and Critical Properties of Selected Elements and Compounds

Substance	Chemical Formula	$M$ (kg/kmol)	$T_c$ (K)	$p_c$ (bar)	$Z_c = \frac{p_c v_c}{RT_c}$
Acetylene	$C_2H_2$	26.04	309	62.8	0.274
Air (equivalent)	—	28.97	133	37.7	0.284
Ammonia	$NH_3$	17.03	406	112.8	0.242
Argon	Ar	39.94	151	48.6	0.290
Benzene	$C_6H_6$	78.11	563	49.3	0.274
Butane	$C_4H_{10}$	58.12	425	38.0	0.274
Carbon	C	12.01	—	—	—
Carbon dioxide	$CO_2$	44.01	304	73.9	0.276
Carbon monoxide	CO	28.01	133	35.0	0.294
Copper	Cu	63.54	—	—	—
Ethane	$C_2H_6$	30.07	305	48.8	0.285
Ethanol	$C_2H_5OH$	46.07	516	63.8	0.249
Ethylene	$C_2H_4$	28.05	283	51.2	0.270
Helium	He	4.003	5.2	2.3	0.300
Hydrogen	$H_2$	2.016	33.2	13.0	0.304
Methane	$CH_4$	16.04	191	46.4	0.290
Methanol	$CH_3OH$	32.04	513	79.5	0.220
Nitrogen	$N_2$	28.01	126	33.9	0.291
Octane	$C_8H_{18}$	114.22	569	24.9	0.258
Oxygen	$O_2$	32.00	154	50.5	0.290
Propane	$C_3H_8$	44.09	370	42.7	0.276
Propylene	$C_3H_6$	42.08	365	46.2	0.276
Refrigerant 12	$CCl_2F_2$	120.92	385	41.2	0.278
Refrigerant 22	$CHClF_2$	86.48	369	49.8	0.267
Refrigerant 134a	$CF_3CH_2F$	102.03	374	40.7	0.260
Sulfur dioxide	$SO_2$	64.06	431	78.7	0.268
Water	$H_2O$	18.02	647.3	220.9	0.233

Sources: Adapted from *International Critical Tables* and L. C. Nelson and E. F. Obert, Generalized Compressibility Charts, *Chem. Eng.*, 61: 203 (1954).

## LAMPIRAN 4

