



TESIS - TM142502

**PENENTUAN MAJOR INSPECTION INTERVAL  
BERDASARKAN KINERJA KOMPRESSOR PADA  
TURBIN GAS**

JAYADI  
2116207717

DOSEN PEMBIMBING  
Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN MANAJEMEN ENERGI  
KERJASAMA PT. PJB  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018









THESIS - TM142502

**DETERMINATION OF MAJOR INSPECTION  
INTERVAL BASED ON TURBINE GAS  
COMPRESSOR PERFORMANCE**

JAYADI  
2116207717

SUPERVISOR  
Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D

MASTER PROGRAM  
FIELD STUDY OF ENERGY MANAGEMENT  
IN COOPERATION WITH PT. PJB  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2018







LEMBAR PENGESAHAN

TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T.)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:  
Jayadi  
NRP: 2116207717

Tanggal Ujian: 20 Juli 2018  
Periode Wisuda: September 2018

Disetujui oleh:

  
1. Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D  
NIP: 197805102001121001

(Pembimbing)

  
2. Dr. Sutikno, ST. MT.  
NIP: 197407032000031001

(Penguji)

  
3. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA  
NIP: 196508101991021001

(Penguji)

  
4. Dr. Unggul Wasiwitono, ST., M. Eng.  
Sc.  
NIP: 197805102001121001

(Penguji)

Dekan Fakultas Teknologi Industri



  
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, ST., MT.  
NIP: 196905071995121001



# **PENENTUAN MAJOR INSPECTION INTERVAL BERDASARKAN KINERJA KOMPRESSOR TURBIN GAS**

Nama Mahasiswa : Jayadi  
NRP : 2116207717  
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS  
Pembimbing : Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D

## **ABSTRAK**

Turbin gas merupakan jenis unit pembangkit yang banyak digunakan di seluruh dunia dewasa ini. Dalam pengoperasian dan pemeliharaan turbin gas, faktor-faktor penting yang sangat diperhatikan adalah maintenance costs, availability, dan reability. Untuk itu diperlukan perencanaan pemeliharaan yang komprehensif, baik yang bersifat periodik maupun non-periodik. Dengan menggunakan interval inspeksi berdasarkan time-based, Major Inspection akan dilakukan pada saat 48.000 EOH dengan dua kemungkinan kondisi performa: unit masih dalam kondisi sehat atau unit breakdown sebelum jadwal inspeksi. Untuk itu, tesis ini bertujuan untuk menentukan interval untuk Major Inspection berdasarkan kinerja kompressor dengan metode regresi. Dengan metode penentuan interval inspeksi condition-based dapat meningkatkan keandalan dan kesiapan unit, serta mengoptimalkan biaya pemeliharaan.

Penelitian ini diawali dengan pengambilan data parameter input dalam perhitungan efisiensi kompressor meliputi temperatur udara ambient, tekanan udara ambient, dan temperatur udara tekan. Data output yang diperoleh dari proses perhitungan meliputi tekanan udara tekan absolute, temperatur udara tekan ideal, kerja kompressor ideal, kerja kompressor aktual, dan efisiensi kompressor. Regresi linier dilakukan dengan jumlah jam operasi turbin gas sebagai variabel prediktor dan nilai efisiensi kompressor sebagai variabel respon. Fungsi regresi linier kemudian diuji dengan Significant Level dan Skewness untuk menentukan kemungkinan perubahan fungsi menjadi regresi non-linier.

Hasil dari penelitian ini, pola penurunan efisiensi kompressor terjadi secara non-linier kuadratik. Proyeksi fungsi regresi kuadratik terhadap skenario batas efisiensi kompressor yang ditentukan sebesar 80%, 85%, dan 90% diperoleh interval Major Inspection pada 46785 EOH, 38329 EOH, dan 26700 EOH.

**Kata kunci:** *maintenance costs, major inspection, equivalent operating hours, interval inspeksi, time-based, regresi, condition-based*

---

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **DETERMINATION OF MAJOR INSPECTION INTERVAL BASED ON TURBINE GAS COMPRESSOR PERFORMANCE**

Name : Jayadi  
NRP : 2116207717  
Major : Mechanical Engineering FTI-ITS  
Supervisor : Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D

## **ABSTRACT**

Gas turbines are a type of generating unit that is widely used throughout the world today. In gas turbine operation and maintenance, maintenance costs, availability, and reliability are some of the main concerns of gas turbine users. Therefore comprehensive maintenance planning is required, both of which are periodic or non-periodic. By using time-based inspection intervals, Major Inspection of General Electric gas turbine model MS9001E will be held at 48,000 Equivalent Operating Hours (EOH) with two possible performance conditions: gas turbine engines may be overhauled when they are still in a very good health condition or may fail before a scheduled overhaul. This paper aims to determine the interval for Major Inspection based on compressor performance with regression method. By using condition based inspection interval method, gas turbine users can improve engine reliability and readiness, and also optimize maintenance costs. Methodology used in this paper is to determine next Major Inspection based on non-linear quadratic regression of compressor efficiency historical data since the latest Major Inspection by using Microsoft Excel and Minitab software. As the result of this study, by projecting pre-defined compressor efficiency at 80%, major inspection interval will be held at 46785 EOH, at 85% major inspection interval will be held at 38329 EOH, and at 90% major inspection interval will be held at 26700 EOH.

**Keyword : *Maintenance costs, major inspection, equivalent operating hours, interval inspeksi, time-based, regresi, condition-based***

---

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur penulis curahkan sepenuhnya kepada Allah SWT, karena atas limpahan rahmat dan karunia-Nya Tesis ini dapat terselesaikan tepat waktu. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak yang berkenan membantu dan mendukung baik secara moril dan materiil dalam proses penyelesaian Tesis ini, antara lain:

1. Herliani Pudji Rahayu selaku istri, putra tercinta Geviano Kiandra Rivandika, kedua orang tua serta anggota keluarga lainnya yang selalu memberikan dukungan kepada penulis dalam penyelesaian tesis ini, terima kasih buat kesabaran, motivasi, dukungan dan doa-doanya selama ini.
2. Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D selaku dosen pembimbing tesis yang telah memberikan saran, motivasi serta ilmu-ilmu yang bermanfaat bagi penulis.
3. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA, Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST., M.Eng. Sc, dan Dr. Eng. Sutikno, ST., MT. selaku dosen penguji.
4. Prof. Dr. Ir. Eng. Prabowo, M.Eng selaku Ketua Prodi Pasca Teknik Mesin.
5. Ir. Bambang Pramujati, M.Sc., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin ITS.
6. Bapak-bapak dan ibu-ibu dosen pengajar, seluruh staf dan karyawan Teknik Mesin FTI ITS Surabaya
7. Seluruh jajaran direksi PT. PJB yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk belajar dan menuntut ilmu di Teknik Mesin FTI ITS Surabaya
8. Manajemen dan rekan-rekan PT. PJB UP. Muara Karang, terimakasih atas dukungan, bantuan, dan referensi data penelitian yang diberikan selama ini.
9. Rekan-rekan Manajemen Energi Teknik Mesin FTI-ITS.
10. Dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas dukungan dan bantuannya selama ini.

Kekurangan atau kesalahan tentu masih ada, namun bukan suatu yang disengaja, hal tersebut semata-mata disebabkan karena kekhilafan dan keterbatasan yang dimiliki. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan Tesis ini.

Akhir kata, semoga Tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca serta dapat memberikan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan. Aamiin yaa robbal'alamiin.

Surabaya, 20 Juli 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	v
<b>ABSTRAK</b>	vii
<b>ABSTRACT</b>	ix
<b>KATA PENGANTAR</b>	xi
<b>DAFTAR ISI</b>	xiii
<b>DAFTAR TABEL</b>	xv
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	xvii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.2.1 Batasan Masalah .....	3
1.2.2 Asumsi Penelitian .....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>5</b>
2.1 Gambaran umum proses overhaul pada unit pembangkit	5
2.2 Gambaran umum PLTGU Blok 1 UP Muara Karang	8
2.3 Kinerja kompressor	13
2.4 Interval inspeksi	14
2.5 Penelitian sebelumnya	16
2.6 Teori regresi dan korelasi	21
2.6.1 Fungsi regresi populasi dan fungsi regresi sampel .....	24
2.6.2 Pengertian istilah linier .....	28
2.6.3 Linieritas dalam variabel.....	28
2.6.4 Linieritas dalam parameter .....	29
2.6.5 Regresi linier bersyarat sederhana dan berganda.....	30
2.6.6 Metode kuadrat terkecil dalam model regresi linier sederhana .....	30
2.6.7 Asumsi model regresi linier klasik: metode kuadrat terkecil.....	33
2.6.8 Ciri-ciri penaksir metode kuadrat terkecil .....	34
2.6.9 Metode kuadrat terkecil dalam model regresi linier berganda.....	35
2.6.10 Menghitung nilai t statistik .....	36
2.6.11 Koefisien determinasi: suatu ukuran kebaikan-kesesuaian.....	37

2.6.12 Koefisien korelasi.....	41
2.6.13 Membandingkan dua nilai koefisien determinasi.....	42
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN</b>	<b>43</b>
3.1 Diagram alir penelitian	43
3.2 Identifikasi masalah	44
3.3 Perumusan masalah dan tujuan penelitian	45
3.4 Pengumpulan data	45
3.4.1 Data inspeksi sebelumnya .....	45
3.4.2 Data input .....	46
3.4.3 Data output .....	46
3.4.4 Variabel penelitian .....	47
3.5 Perhitungan efisiensi kompressor	47
3.6 Regresi linier	49
3.7 Compability check	50
3.8 Regresi non-linier	51
3.9 Proyeksi batas efisiensi terhadap fungsi regresi	51
3.10 Menentukan prediksi <i>remaining useful life</i>	52
<b>BAB 4 PEMBAHASAN</b>	<b>53</b>
4.1 Hasil pengumpulan data	53
4.2 Hasil perhitungan efisiensi kompressor	53
4.3 Hasil regresi linier	54
4.4 Hasil compability check	57
4.4.1 Hasil compability check periode 2009-2014.....	57
4.4.2 Hasil compability check periode 2014-2017.....	57
4.5 Regresi non-linier (kuadratik)	58
4.6 Analisa prediksi <i>remaining useful life</i>	59
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN</b>	<b>61</b>
5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran	61
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	<b>63</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Perbandingan Jadwal MI Terakhir .....	45
Tabel 3.2 Histori MI GTG1.1 .....	46
Tabel 3.3 Data Input .....	46
Tabel 3.4 Data Output .....	47
Tabel 3.5 Data Hasil Perhitungan Efisiensi Kompresor .....	49
Tabel 4.1 Hasil Pengumpulan Data Input .....	53
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Efisiensi Kompresor .....	53
Tabel 4.3 Compability check periode 2009-2014 .....	57
Tabel 4.4 Compability check periode 2014-2017 .....	58
Tabel 4.5 Proyeksi Batas Efisiensi Untuk Interval <i>Major inspection</i> .....	60
Tabel 4.6 Skenario Remaining Useful Life .....	60

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Karakteristik Performa Peralatan .....	6
Gambar 2.2 Turbin Gas General Electric MS9001E .....	8
Gambar 2.3 Lingkup <i>Combustion Inspection</i> .....	9
Gambar 2.4 Lingkup <i>Hot Gas Path Inspection</i> .....	10
Gambar 2.5 Lingkup <i>Major Inspection</i> .....	11
Gambar 2.6 Lingkup <i>Inspection</i> GE MS9001E .....	12
Gambar 2.7 Pengaruh Jumlah Starts vs Jumlah Jam Operasi .....	13
Gambar 2.8 Pengaruh Blade Fouling Kompresor .....	14
Gambar 2.9 Batasan Penentuan Interval Inspeksi .....	15
Gambar 2.10 Pola Degradasi dan Prognosa .....	17
Gambar 2.11 Diagram Alir Penelitian Sebelumnya .....	18
Gambar 2.12 Degradasi Performance Periode Inspeksi Sebelumnya .....	19
Gambar 2.13 Prognosa Hasil Regresi Linear .....	20
Gambar 2.14 Prognosa Hasil Regresi Kuadratik .....	21
Gambar 2.15 Bentuk-Bentuk Korelasi Linier dan non-Linier .....	23
Gambar 2.16 Kurva Permintaan Linier Dan Non-Linier .....	29
Gambar 2.17 Perincian Variasi $Y_i$ ke Dalam Dua Bagian .....	38
Gambar 3.1a Diagram Alir Penelitian .....	43
Gambar 3.1b Diagram Alir Penelitian (lanjutan) .....	44
Gambar 3.2 Siklus Brayton .....	48
Gambar 3.3 Sum Square of Residual .....	51
Gambar 4.1 Regresi Linear .....	54
Gambar 4.2 Regresi Kuadratik .....	58
Gambar 4.3 Proyeksi Standard Major Inspection .....	59

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Turbin gas merupakan salah satu jenis mesin pembangkit listrik yang banyak digunakan di dunia baik yang dioperasikan secara simple cycle maupun secara combined cycle. Turbin Gas berfungsi untuk membangkitkan energi mekanis dari sumber energi panas yang dihasilkan pada proses pembakaran. Selanjutnya energi mekanis ini membangkitkan energi listrik dengan memutar generator baik melalui perantara Load Gear ataupun tidak, sehingga diperoleh energi listrik.

Sebagai aset yang bernilai tinggi, turbin gas harus dioperasikan dan dipelihara secara rutin berdasarkan manual book dari pihak manufaktur. Seiring berjalannya waktu, turbin gas akan mengalami penurunan performance sehingga kegiatan pemeliharaan diperlukan untuk mengembalikan performance ke kondisi semula. Untuk pemeliharaan yang bersifat periodik, tipe pemeliharaan/inspeksi turbin gas terbagi atas Combustion Inspection (CI), Hot Gas Path Inspection (HGPI), dan Major Inspection (MI).

PT Pembangkitan Jawa-Bali UP Muara Karang PLTGU Blok 1 memiliki tiga unit turbin gas General Electric model 9001E yang dioperasikan secara combined cycle dengan pola 3-3-1 (tiga turbin gas-tiga HRSG-1 turbin uap). Pemeliharaan unit tersebut dilakukan secara periodik dengan siklus CI-CI-HGPI-CI-CI-MI dengan interval antar inspeksi 8000 Equivalent Operating Hours (EOH) atau 900 kali jumlah start.

Berdasarkan manual book GE, interval inspeksi dihitung berdasarkan perhitungan hours-based atau starts-based, tergantung yang mana tercapai lebih dulu. Perhitungan interval inspeksi pada OEM GE berbeda dengan OEM turbin gas lainnya, seperti misalnya turbin gas Mitsubishi dimana interval inspeksi hanya berdasarkan hours-based. Adapun jumlah start dapat dikonversi menjadi variable pada perhitungan Equivalent Operating Hours (EOH).

Sejak commissioning pada Tahun 1993, PLTGU Blok 1 dioperasikan secara continuous duty. Namun terhitung Tahun 2010 masuknya pembangkit batubara proyek 10.000 MW yang memiliki biaya pokok produksi lebih murah, PLTGU Blok 1 dioperasikan secara cyclic duty sehingga intensitas start-stop turbin gas cukup tinggi. Dengan mode operasi tersebut, jumlah start-stop rata-rata turbin gas mencapai 300 kali dalam setahun. Meskipun demikian, dalam penentuan interval inspeksi, EOH masih lebih dulu tercapai daripada jumlah start-stop. Pada turbin gas Mitsubishi, jumlah start-stop dimasukkan sebagai variabel dalam perhitungan EOH sehingga semakin tinggi jumlah start-stop maka EOH untuk penentuan interval inspeksi semakin cepat terpenuhi.

Metode penentuan interval inspeksi turbin gas dengan acuan EOH merupakan konsep pemeliharaan time-based. Terdapat beberapa literatur yang membahas tentang penentuan prediksi interval inspeksi dengan perhitungan condition-based turbin gas berdasarkan historical data. Dengan data gas path analysis dan performa compressor, nilai prediksi interval inspeksi dapat diperoleh baik dengan skenario pesimis ataupun optimis.

Berdasarkan hal-hal yang telah dijelaskan sebelumnya, maka penelitian tentang prognosa atau prediksi interval inspeksi turbin gas dengan condition-based diperlukan untuk memperkirakan sisa useful life dari turbin gas sebelum dilakukan major inspection selanjutnya berdasarkan historical data kesehatan mesin. Metode ini diharapkan dapat menggantikan metode time-based yang sudah ada dengan tujuan untuk meningkatkan reliability dan availability mesin serta menekan biaya life cycle turbin gas secara keseluruhan.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan uraian pada sub bab Latar Belakang, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana pola degradasi efisiensi kompresor berdasarkan historical data sebelumnya
2. Bagaimana menentukan remaining useful life turbin gas berdasarkan pola degradasi efisiensi kompresor yang telah diperoleh

### **1.2.1 Batasan Masalah**

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini agar berjalan secara terarah dan dapat mencapai tujuan yang diinginkan adalah sebagai berikut:

1. Historical data yang digunakan dibatasi pada interval major inspection overhaul sebelumnya hingga data terkini.
2. Perhitungan performa kompresor hanya berdasarkan nilai efisiensi dan mengabaikan kapasitas flow. Hal ini disebabkan tidak tersedianya peralatan instrumentasi untuk mengukur parameter kapasitas flow tersebut.

### **1.2.2 Asumsi Penelitian**

Asumsi yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Dalam perhitungan Equivalent Operating Hours (EOH), variable yang digunakan hanyalah jenis bahan bakar yang digunakan
2. Tekanan udara ambient dianggap sama dengan 1 Bar
3. Turbin gas beroperasi dengan normal
4. Alat ukur yang digunakan dalam keadaan layak dan terkalibrasi

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pola degradasi efisiensi kompresor berdasarkan historical data sebelumnya.
2. Menentukan remaining useful life turbin gas berdasarkan pola degradasi efisiensi kompresor yang telah diperoleh.

### **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Meningkatkan reliability dan availability turbin gas sehingga dapat menunjang pencapaian target kinerja operasi
2. Menekan biaya life cycle dari turbin gas antar siklus major inspection overhaul

3. Sebagai referensi alternatif metode perhitungan interval inspeksi turbin gas berdasarkan condition-based.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

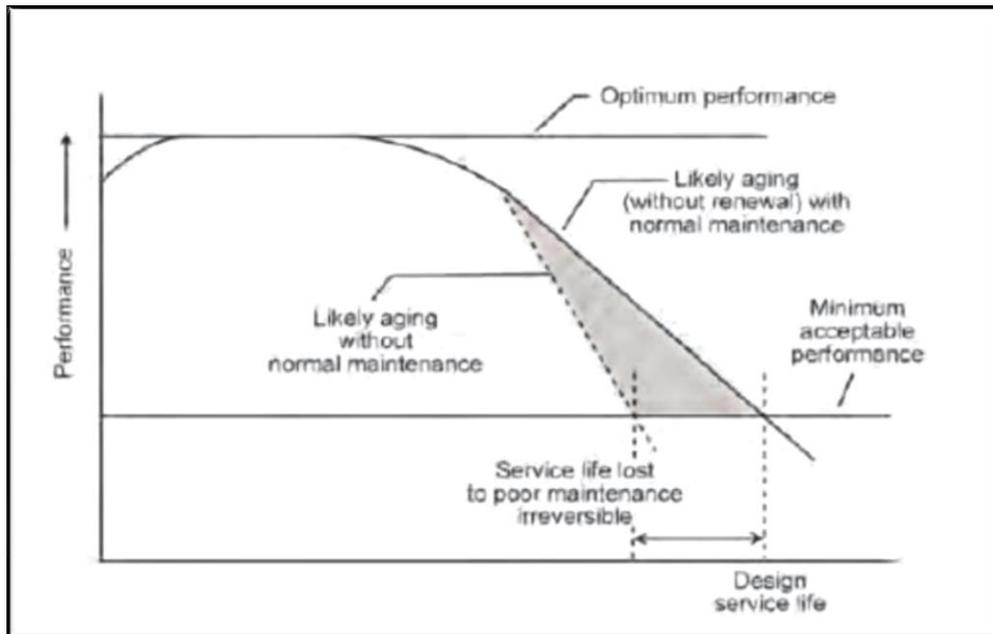
#### **2.1 Gambaran umum proses overhaul pada unit pembangkit**

Dalam tinjauan manajemen aset, *reliability* dan biaya pemeliharaan merupakan dua faktor yang sangat penting dalam mengelola suatu mesin pembangkit khususnya turbin gas. Untuk itu diperlukan suatu manajemen pemeliharaan yang bersifat jangka pendek dan jangka panjang untuk dapat mengoptimalkan biaya pemeliharaan dan meningkatkan kesiapan unit pembangkit.

British Glossary of Terms mendefinisikan maintenance sebagai “*The combination of all technical and administrative actions, including supervision actions, intended to retain an item in, or restore it to, a state in which it can perform a required function*”. Juga didefinisikan sebagai “*a set of organised activities that are carried out in order to keep an item in its best operational condition with minimum cost acquired.*”

Dapat diterjemahkan sebagai “kombinasi antara tindakan teknik dan administrative, termasuk supervisi, dimaksudkan untuk mempertahankan kondisi atau mengembalikan kondisi, dimana peralatan dapat berfungsi sesuai yang diinginkan” atau “suatu aktivitas yang terorganisasi untuk membawa peralatan pada kondisi operasional terbaik dengan biaya yang minimal”.

Gambar 2.1 menunjukkan karakteristik performa sebuah peralatan. Sumbu tegak menyatakan performa sedang sumbu mendatar adalah waktu. Saat instalasi pertama, performa peralatan biasanya relatif rendah. Pada kurva lain, fase ini sering disebut juga sebagai *burn in period*, dimana peralatan mengalami adaptasi sejak dilepas manufaktur pabrikan. Pada fase awal ini, tingkat kerusakan (*failure rate*) cenderung tinggi tapi berangsur-angsur menurun. Penurunan ini sebanding dengan kenaikan performa. Hingga pada suatu kondisi, peralatan berada pada performa optimumnya. Kenaikan performa ini akan berhenti dan cenderung steady pada level tertentu. Fase ini akan bertahan sampai periode waktu tertentu yang dikenal sebagai usia ekonomis.



Gambar 2.1: Karakteristik performa peralatan

Secara natural, performa peralatan akan mulai menurun setelah usia ekonomisnya terlewati sampai mencapai batas minimal performa dapat diterima. Proses penurunan ini lazim disebut *aging*. Dari sini ada perbedaan, ketika proses *aging* dilalui tanpa pemeliharaan (*likely aging without normal maintenance*) dibandingkan jika dilakukan maintenance tanpa penggantian part (*likely aging without renewal with normal maintenance*). Nampak bahwa ketika peralatan dilakukan pemeliharaan (tanpa penggantian), akan memberikan pertambahan usia (*life time extention*), dimana user dapat memanfaatkan peralatan dengan waktu yang lebih lama. Selisih life time jika dipelihara dan tanpa *maintenance* mengindikasikan keuntungan dari aktivitas pemeliharaan.

Secara lebih lengkap, tujuan pemeliharaan dijelaskan sebagai berikut Abed Schock (2010):

1. Memaksimalkan produksi

Dengan minimnya gangguan peralatan, kesempatan berproduksi akan semakin banyak.

2. Menurunkan *breakdown*

*Breakdown* yang dimaksud adalah suatu sistem peralatan berhenti total dan tidak dapat beroperasi sama sekali. Langkah *recovery* memerlukan penanganan yang serius.

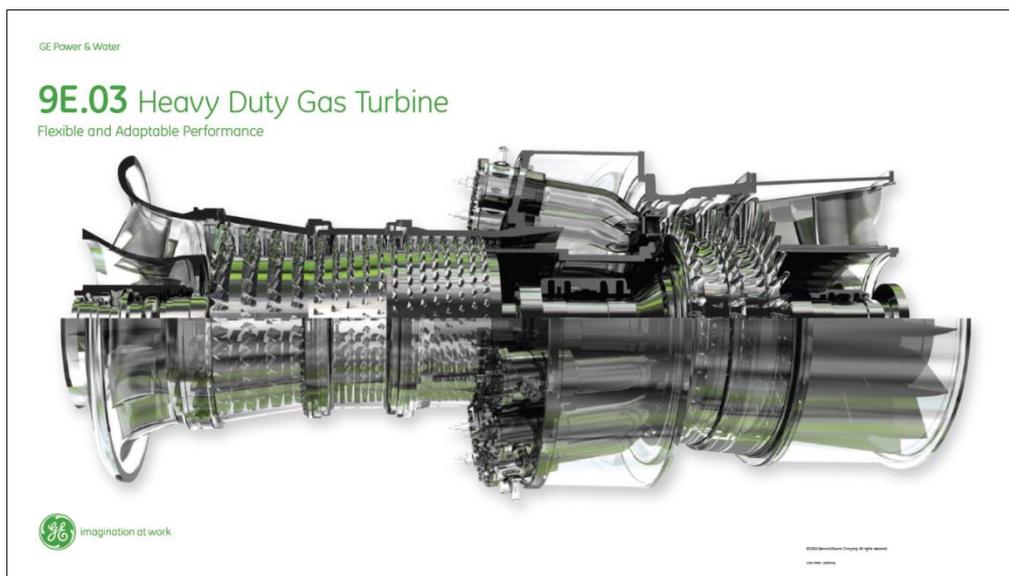
3. Meminimalkan penggunaan energi  
Dengan pemeliharaan yang optimal, peralatan akan beroperasi efisien sehingga penggunaan energi dapat ditekan.
4. Mengurangi *downtime*  
Yaitu berhentinya peralatan yang menyebabkan berhentinya proses produksi. Biasanya durasi *down time* relative lebih singkat dan dapat mudah dipulihkan.
5. Mengoptimalkan umur peralatan  
Dengan terjaminnya kualitas pemeliharaan, umur peralatan akan lebih panjang seperti telah dijelaskan sebelumnya.
6. Meningkatkan efisiensi peralatan  
Pemeliharaan juga membuat peralatan lebih efisien dalam mengkonsumsi energi
7. Memberikan manfaat pengendalian anggaran  
Pemeliharaan yang lebih terencana membuat manajemen lebih mudah membuat anggaran perusahaan. Di sisi lain, pengalokasian anggaran secara mendadak untuk keperluan *emergency* bisa ditekan.
8. Meningkatkan pengendalian persediaan (*inventory control*)  
Pemeliharaan yang baik juga mendukung pembuatan perencanaan material, dimana pengadaan dan pemakaian material bisa terencana secara baik.
9. Mengoptimalkan utilisasi *resources*  
Penggunaan *resources* (tenaga kerja) saat ini semakin mahal dan berharga. Pemeliharaan yang baik akan menyebabkan *resources* terutilisasi maksimal.
10. Implementasi penurunan biaya  
Muara dari semua tujuan pemeliharaan adalah penurunan biaya. Hal ini sinergi dengan tujuan perusahaan yang harusnya berwawasan bisnis.

## 2.2 Gambaran umum PLTGU Blok 1 UP Muara Karang

PLTGU Blok 1 UP Muara Karang terdiri atas tiga unit turbin gas yang dikombinasikan dengan satu unit turbin uap dengan pola operasi 3-3-1 (3 turbin gas-3 HRSG-1 turbin uap) yang telah dioperasikan sejak Tahun 1993 dengan kapasitas daya terpasang 3x100 MW untuk turbin gas dan 1x185 MW untuk turbin uap.

Adapun spesifikasi teknis dari turbin gas tersebut (Gambar 2.2) adalah sebagai berikut:

<i>Manufacture</i>	: General Electric
<i>Model series</i>	: MS9001E
<i>Rating</i>	: 107860 ( <i>Natural gas</i> ); 105706 kW ( <i>Fuel oil</i> )
<i>Compressor stage</i>	: 17
<i>Turbine Exhaust temp</i>	: 1005 F
<i>Pressure</i>	: 14.7 PSIA
<i>Speed</i>	: 3000 RPM
<i>Shaft rotation</i>	: <i>Counterclockwise</i>
<i>Control</i>	: Mark IVe SPEEDTRONIC
<i>Protection</i>	: <i>Overspeed, overtemperature, vibration, and flame detection</i>



Gambar 2.2: Turbin gas General Electric MS9001E

Pemeliharaan periodik turbin gas GE MS9001E berdasarkan buku manual (Gambar 3) terbagi atas tiga, yaitu:

1. *Combustion Inspection (CI)*

Merupakan tipe inspeksi yang paling singkat dibandingkan tipe inspeksi lainnya dengan lingkup pekerjaan meliputi pemeriksaan komponen ruang bakar seperti *fuel nozzles, liners, transition piece, cross fire tube, retainers, spark plug, flame detector, dan combustor flow sleeves* yang merupakan komponen prioritas utama untuk dilakukan proses *repair* atau penggantian.

Dengan inspeksi dan pemeliharaan yang baik dari komponen tersebut akan memengaruhi umur pakai dari komponen downstream turbin gas, seperti turbin *nozzle* dan *bucket*. *Combustion liner, transition piece, dan fuel nozzle* harus dilakukan *disassembly* untuk selanjutnya dilakukan penggantian komponen baru ataupun komponen yang telah direpair sebelumnya sehingga dapat mengurangi *downtime* unit. Gambar 2.3 berikut ini menunjukkan bagian yang akan dilakukan inspeksi pada CI:

Combustion Inspection		
Key Hardware	Inspect For	Potential Action
Combustion liners	Foreign object damage (FOD)	Repair/refurbish/replace
Combustion end covers	Abnormal wear	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transition Pieces</li> <li>• Fuel nozzles</li> </ul>
Fuel nozzles	Cracking	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Strip and recoat</li> <li>- Weld repair</li> </ul>
End caps	Liner cooling hole plugging	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Weld repair</li> <li>- Flow test</li> </ul>
Transition pieces	TBC coating condition	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Creep repair</li> <li>- Leak test</li> </ul>
Cross fire tubes	→ Oxidation/corrosion/erosion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Liners</li> </ul>
Flow sleeves	Hot spots/burning	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Strip and recoat</li> </ul>
Purge valves	Missing hardware	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Weld repair</li> </ul>
Check valves	Clearance limits	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hula seal replacement</li> </ul>
Spark plugs		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Repair out-of-roundness</li> </ul>
Flame detectors		
Flex hoses		
IGVs and bushings		
Compressor and turbine (borescope)		
Exhaust diffuser	→ Cracks	→ Weld repair
Exhaust diffuser Insulation	→ Loose/missing parts	→ Replace/tighten parts
Forward diffuser flex seal	→ Wear/cracked parts	→ Replace seals
Compressor discharge case	→ Cracks	→ Repair or monitor
Cases - exterior	→ Cracks	→ Repair or monitor

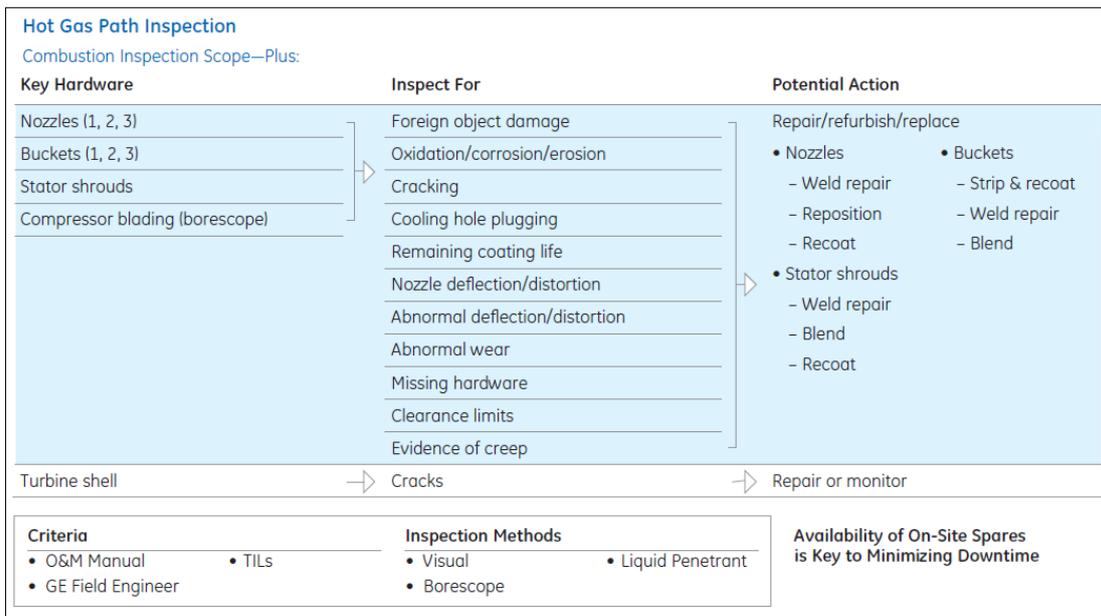
Criteria	Inspection Methods	Availability of On-Site Spares is Key to Minimizing Downtime
<ul style="list-style-type: none"> <li>• OSM Manual</li> <li>• GE Field Engineer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visual</li> <li>• Borescope</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TILs</li> <li>• Liquid Penetrant</li> </ul>

Gambar 2.3: Lingkup *combustion inspection*

## 2. Hot Gas Path Inspection (HGPI)

Merupakan tipe inspeksi menengah yang meliputi keseluruhan lingkup CI ditambahkan dengan scope pemeriksaan komponen turbin yang terpapar aliran gas panas dari ruang bakar seperti *turbine nozzles* (sudu tetap), *turbine buckets* (sudu gerak), dan *stator shrouds*.

Pada tipe HGPI, disassembly dilakukan terhadap seluruh komponen transition piece dan *1st stage turbine nozzle*, sedangkan *disassembly 2nd* dan *3rd stage turbin nozzle* tergantung dari hasil observasi mengenai kondisi visual, pengukuran *clearance*, dan hasil inspeksi lainnya. Pemeriksaan kondisi *1st, 2nd, dan 3rd stage bucket* dilakukan tanpa proses disassembly dengan metode *Fluorescent Penetrant Inspection (FPI)* untuk mengetahui kemungkinan terjadi *crack* pada *airfoil*. Gambar 2.4 berikut ini menunjukkan bagian yang akan dilakukan inspeksi pada HGPI:



Gambar 2.4: Lingkup *hot gas path inspection*

## 3. Major Inspection (MI)

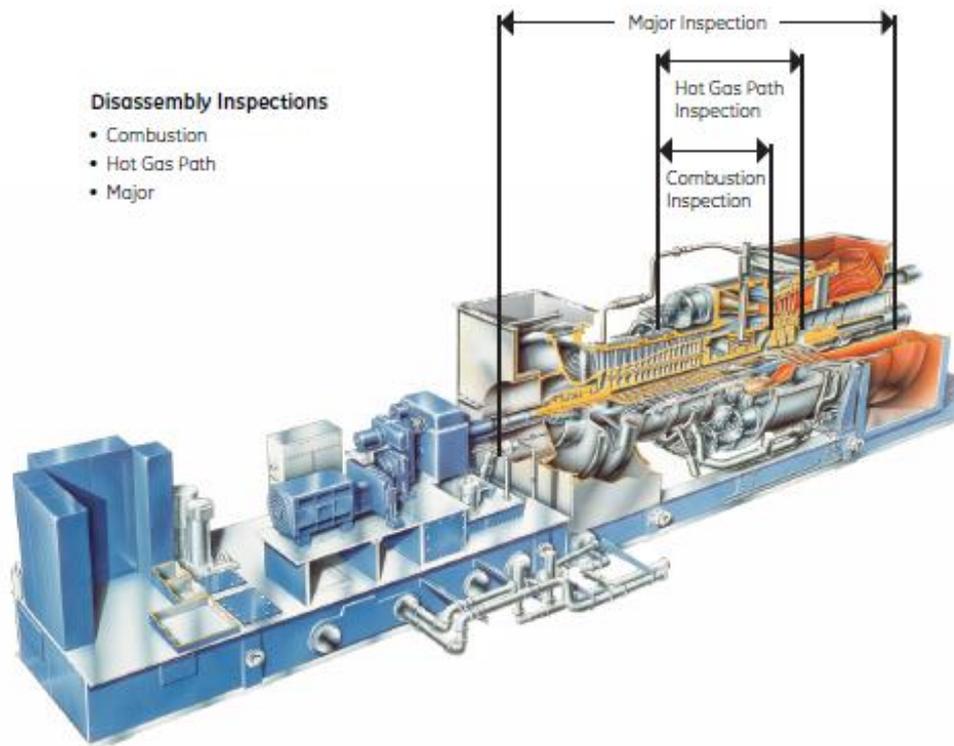
Merupakan tipe inspeksi total dengan scope HGPI ditambahkan dengan pemeriksaan keseluruhan komponen *rotating* dan *stationer turbin gas* seperti *compressor, rotor, bearing, dan exhaust* sistem. Lingkup MI harus

direncanakan berdasarkan manual standar dan rekomendasi hasil inspeksi *borescope* dan HGPI sebelumnya.

Pada tipe MI dilakukan disassembly terhadap seluruh *upper casing* yang memungkinkan adanya akses terhadap *rotor* dan *blade* kompressor. Inspeksi pada kompressor turbin meliputi pemeriksaan *inlet guide vane*, *flow path fouling*, *erosion*, *corrosion*, *leakage*, dan *blade cleaning*. Gambar 2.5 dan 2.6 berikut ini menunjukkan bagian yang akan dilakukan inspeksi pada MI:

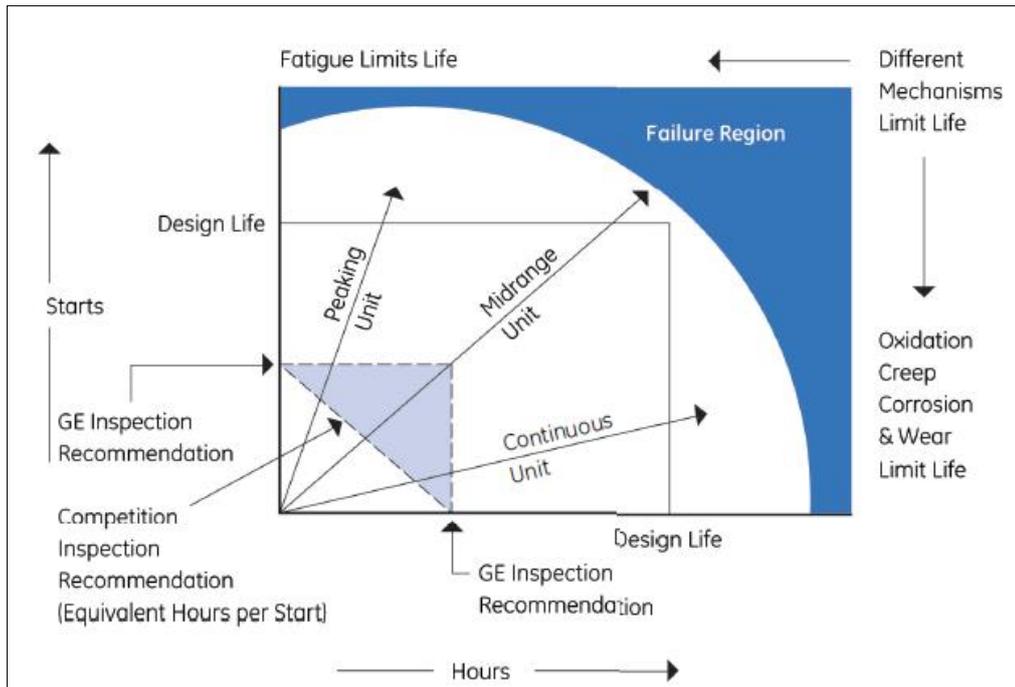
Major Inspection												
Hot Gas Path Inspection Scope—Plus:												
Key Hardware	Inspect For	Potential Action										
Compressor blading	Foreign object damage Oxidation/corrosion/erosion Cracking Leaks Abnormal wear Missing hardware Clearance limits Coating wear Fretting	Repair/refurbishment/replace										
Unit rotor		• Bearings/seals										
Journals and seal surfaces		- Clean										
Bearing seals		- Assess oil condition										
Exhaust system		- Re-babbitt										
		• Compressor blades										
		- Clean										
		- Blend										
		• Exhaust system										
		- Weld repair										
		- Replace flex seals/L-seals										
Compressor and compressor discharge case hooks	→ Wear	→ Repair										
All cases - exterior and interior	→ Cracks	→ Repair or monitor										
Cases - Exterior	→ Slippage	→ Casing alignment										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Criteria</th> <th>Inspection Methods</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>• O&amp;M Manual</td> <td>• Visual</td> </tr> <tr> <td>• GE Field Engineer</td> <td>• Borescope</td> </tr> <tr> <td>• TILs</td> <td>• Liquid Penetrant</td> </tr> <tr> <td></td> <td>• Ultrasonics</td> </tr> </tbody> </table>		Criteria	Inspection Methods	• O&M Manual	• Visual	• GE Field Engineer	• Borescope	• TILs	• Liquid Penetrant		• Ultrasonics	
Criteria	Inspection Methods											
• O&M Manual	• Visual											
• GE Field Engineer	• Borescope											
• TILs	• Liquid Penetrant											
	• Ultrasonics											

Gambar 2.5: Lingkup *major inspection*



Gambar 2.6: Lingkup *inspection* GE MS9001E

Berdasarkan *manual book* GE, interval inspeksi ditentukan berdasarkan pola pengoperasian turbin gas apakah *continuous duty* atau *cyclic duty*. Hal ini disebabkan perbedaan efek terhadap umur pemakaian (*useful life*) turbin gas dimana *continuous duty* berpengaruh terhadap efek *creep*, *oxidation*, dan *corrosion* sedangkan *cyclic duty* berpengaruh terhadap *thermal mechanical fatigue* (Gambar 2.7). Untuk itu, interval inspeksi dihitung berdasarkan perhitungan *hours-based* atau *starts-based*, yang mana tercapai lebih dulu.



Gambar 2.7: Pengaruh jumlah starts vs jumlah jam operasi

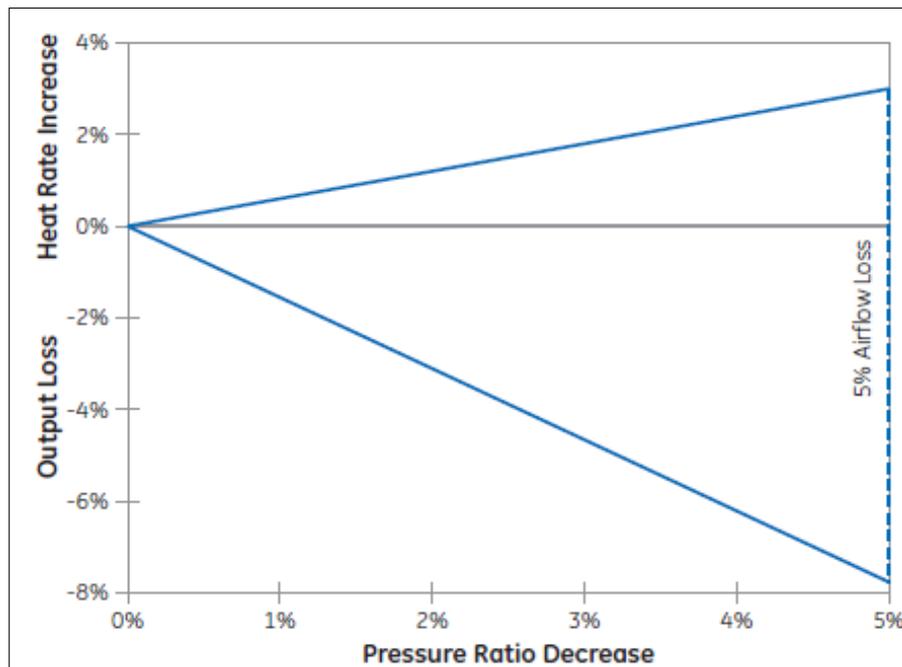
### 2.3 Kinerja kompresor

Kompresor merupakan salah satu komponen utama dari turbin gas yang menghasilkan udara bertekanan yang digunakan dalam proses pembakaran. Kualitas udara pembakaran sangat erat kaitannya dengan proses pemeliharaan dan biaya operasional unit pembangkit karena kinerja kompresor akan mempengaruhi kinerja turbin gas secara keseluruhan. Penurunan kinerja kompresor dapat disebabkan beberapa hal meliputi *blade fouling*, *corrosion*, dan *erosion*.

Terjadinya fouling disebabkan oleh partikel submicron yang terbawa ke dalam kompresor, yang berasal dari uap minyak, asap, ataupun garam dari laut. *Corrosion* pada blade kompresor menyebabkan *pitting* pada permukaan *blade* yang dapat meningkatkan nilai *surface roughness* dan juga menjadi pemicu awal terjadinya *fatigue crack*. Meningkatnya nilai *surface roughness* dan perubahan kontur *blade* menyebabkan menurunnya jumlah aliran udara dan efisiensi kompresor. Hal ini berakibat pada turunnya *output* turbin gas dan efisiensi *thermal* unit.

Secara umum, penurunan kinerja kompresor tipe aksial merupakan penyebab utama terjadinya *losses* pada output dan efisiensi turbin gas. *Losses* akibat *fouling blade* kompresor berkontribusi sekitar 70% - 85% terhadap

penurunan kinerja kompresor. Kondisi fouling dapat mengakibatkan turunnya aliran udara sebesar 5% yang selanjutnya akan menurunkan output turbin gas sampai dengan 8% dan menaikkan nilai *heat rate* sebesar 3%. Hal ini ditunjukkan dari gambar 2.8 berikut ini:



Gambar 2.8: Pengaruh *blade fouling* kompresor

Untuk memulihkan kondisi kompresor akibat fouling ke kondisi semula dapat dilakukan dengan *blade cleaning* secara kimia dan mekanik dimana rotor kompresor harus *disassembly* dari *casing* yang tentunya hanya bisa dilakukan pada tipe pemeliharaan *major inspection*. Mengingat interval inspeksi MI ke MI cukup panjang, *water wash* kompresor dapat dilakukan untuk meminimalisir *losses* akibat *fouling* dan mengurangi deposit dari partikel yang korosif.

## 2.4 Interval inspeksi

Pada Turbin gas GE MS9001E dilakukan pemeliharaan periodik dengan siklus CI-CI-HGPI-CI-CI-MI dengan interval antar inspeksi 8000 *Equivalent Operating Hours* (EOH) atau 900 *Start Factor* (SF) sebagaimana digambarkan pada Gambar 2.9 berikut ini:

Type of Inspection	Combustion System	Factored Hours / Factored Starts										
		MS3002K	MS5001PAI/MS5002C,D	MS6B	MS7E/EA	MS9E	MS6FA	MS7F/FA/FA+	MS7FA+e	MS9F/FA/FA+	MS9FA+e	MS7FB
Combustion	Non-DLN	24,000/400	12,000/800 <sup>(1)X3</sup>	12,000/1,200 <sup>(2)X3</sup>	8,000/900 <sup>(3)</sup>	8,000/900 <sup>(3)</sup>	–	–	–	–	–	–
	DLN	–	8,000/400	12,000/450	12,000/450	12,000/450	8,000/450	8,000/450	12,000/450	8,000/450	8,000/450	8,000/450
Hot Gas Path		24,000/1,200	Eliminated/1,200	24,000/1,200	24,000/1,200	24,000/900	24,000/900	24,000/900	24,000/900	24,000/900	24,000/900	24,000/900
Major		48,000/2,400	48,000/2,400	48,000/2,400	48,000/2,400	48,000/2,400	48,000/2,400	48,000/2,400	48,000/2,400	48,000/2,400	48,000/2,400	48,000/2,400

Factors That Can Reduce Maintenance Intervals

- Fuel
- Load Setting
- Steam/water injection
- Peak Load TF Operation
- Trips
- Start Cycle
- Hardware Design

(1) Units with Lean Head End liners have a 400 starts combustion inspection interval.  
(2) Machines with 6581 and 6BeV combustion hardware have a 12,000/600 combustion inspection interval.  
(3) Multiple Non-DLN configurations exist (Standard, MNQC, IGCC). The most limiting case is shown, however different quoting limits may exist on a machine and hardware basis. Contact a GE Energy representative for further information.

**NOTE:** Factored Hours/Starts intervals include an allowance for nominal trip maintenance factor effects.  
Hours/Starts intervals for Major Inspection are quoted in Actual Hours and Actual Starts.

Gambar 2.9: Batasan penentuan interval inspeksi

Interval inspeksi ditentukan berdasarkan pola pengoperasian turbin gas apakah *continous duty* atau *cyclic duty*. Hal ini disebabkan perbedaan efek terhadap umur pemakaian (*useful life*) turbin gas dimana *continous duty* berpengaruh terhadap efek *creep*, *oxidation*, dan *corrosion* sedangkan *cyclic duty* berpengaruh terhadap *thermal mechanical fatigue*. Untuk itu, interval inspeksi dihitung berdasarkan perhitungan *hours-based* atau *starts-based*, yang mana tercapai lebih dulu.

EOH dapat ditentukan dengan perhitungan sebagai berikut:

$$EOH = AOH \times \sum(K \times Af \times Ap \times t) \quad (2.1)$$

Dimana:

AOH = *Actual Operating Hours (Hr)*

K = *Water/Steam Injection Severity Factor*

Af = *Fuel Severity Factor*

Ap = *Load Severity Factor*

t = *Operating Hours at Load in a Given Operating Mode*

SF dapat ditentukan dengan perhitungan sebagai berikut:

$$SF = AS \times \sum(K \times Af \times At \times Ap \times As \times N) \quad (2.2)$$

Dimana:

- AS = *Actual Starts (Cycle)*  
 K = *Water/Steam Injection Severity Factor*  
 Af = *Fuel Severity Factor*  
 At = *Trip Severity Factor*  
 Ap = *Load Severity Factor*  
 As = *Start Type Severity Factor*  
 N = *Start/Stop Cycles at Load in a Given Operating Mode*

Berbeda dengan turbin gas General Electric, turbin gas Mitsubishi menentukan interval inspeksi hanya berdasarkan EOH dimana jumlah start-stop dimasukkan sebagai salah satu variabel dalam perhitungan EOH dengan rumus sebagai berikut:

$$EOH = (AOH + A \times E) \times F \quad (2.3)$$

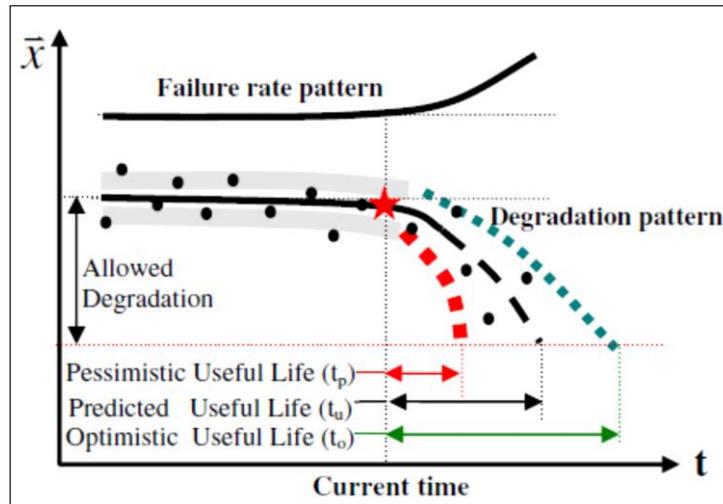
Dimana:

- AOH = *Actual Operating Hours (Hr)*  
 E = *Equivalent Number of Normal Shutdowns, Load Rejection, Trips and Rapid Load Changes*  
 A = *Correction Factor for Equivalent Number of Normal Shutdowns, Load Rejection, Trips and Rapid Load Changes*  
 F = *Fuel Factor*

## 2.5 Penelitian sebelumnya

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan metode pendekatan yang dapat digunakan untuk menggantikan *time-scheduled* maintenance menjadi *condition-based maintenance* seperti Li YG and Nilkitsaranout P, Brotherton et al., Bytington et al., Roemer et al., DePold and Gass, Roemer and Kacprzynski, Hess et al. dan yang lainnya.

Li YG and Nilkitsaranout P dalam penelitiannya berjudul “*Gas Turbine Performance Prognostic For Condition-Based Maintenance*” menuliskan tentang pendekatan prognostik untuk memperkirakan sisa useful life turbin gas untuk merencanakan waktu eksekusi *major inspection overhaul* selanjutnya berdasarkan informasi *historical data*.



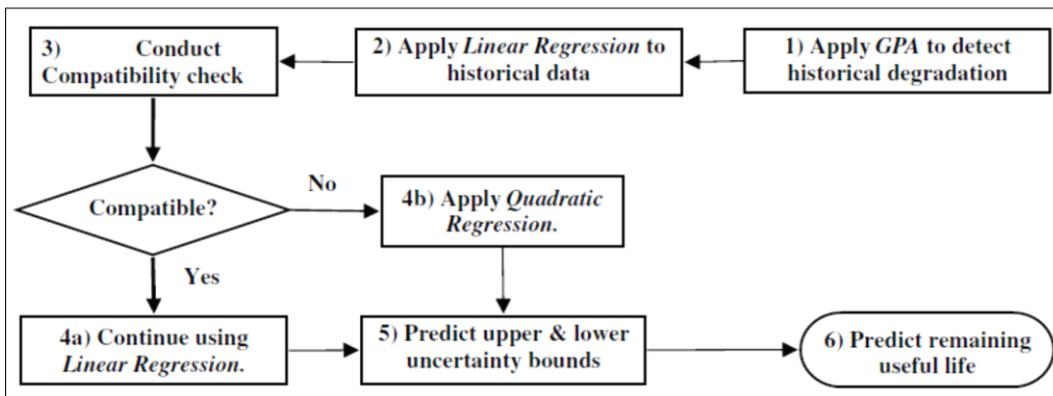
Gambar 2.10: Pola degradasi dan prognosa

Degradasi *performance* dari turbin gas dapat diartikan sebagai besarnya penyimpangan performa terkini turbin gas dibandingkan dengan kondisi saat komisioning. Kondisi tersebut dapat menyebabkan *failure* pada saat turbin gas beroperasi di interval inspeksi. *Gas path analysis* bertujuan untuk mengetahui pola degradasi *performance* turbin gas terhadap waktu berdasarkan *historical* data kesehatan komponen mesin dibandingkan dengan pola *failure rate* mesin sehingga diperoleh prediksi *pessimistic useful life* ( $t_p$ ), *predicted useful life* ( $t_u$ ), dan *optimistic useful life* ( $t_o$ ) yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.

Langkah-langkah penentuan prognosa dilakukan dengan tahapan sebagai berikut (Gambar 2.11):

1. Membuat analisis pola degradasi *performance* unit dengan menggunakan *historical* data sampai dengan kondisi terkini terhadap komponen utama kompressor dan turbin.
2. Membuat prediksi kondisi kesehatan unit berdasarkan *historical* data dengan menggunakan regresi linear
3. Melakukan *compability check* hasil regresi linear yang diperoleh terhadap pola degradasi kesehatan unit
4. (a) Apabila *compability check* menunjukkan prediksi kesehatan unit relevan dengan laju degradasi maka pemodelan dengan regresi linear dapat dilanjutkan.

- (b) Namun apabila *compatibility check* menunjukkan prediksi kesehatan unit tidak relevan dengan laju degradasi maka pemodelan dilanjutkan dengan regresi kuadrat
5. Menentukan batas bawah dan batas atas dari garis prediksi kesehatan unit
  6. Menentukan prediksi *pessimistic* dan *optimistic useful life* berdasarkan nilai batas degradasi yang diijinkan



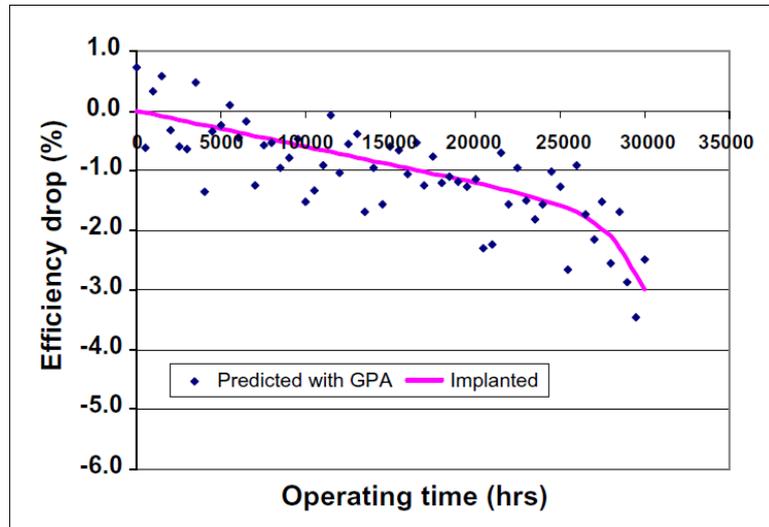
Gambar 2.11: Diagram alir penelitian sebelumnya

Obyek penelitian dalam studi tersebut adalah turbin gas Rolls-Royce industrial AVON Mk 1535 yang terdiri dari satu unit compressor, satu unit burner, satu unit turbin compressor, dan satu unit power turbin dengan spesifikasi teknis sebagai berikut:

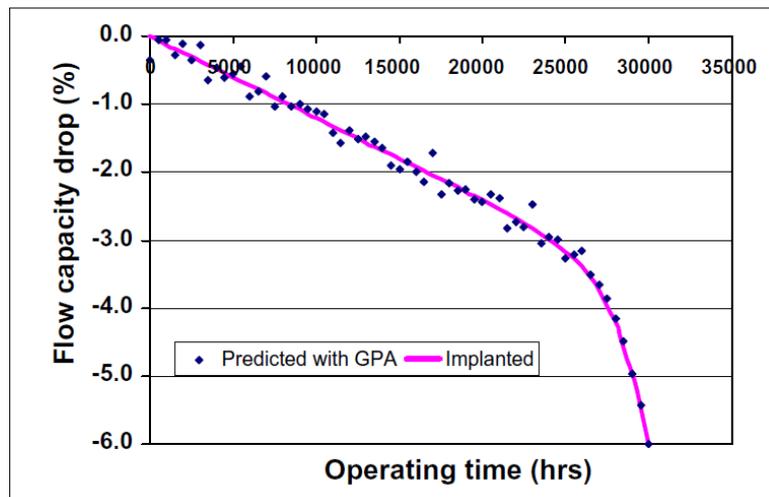
<i>Total pressure ratio</i>	3.33
<i>Turbin entry temperature</i>	869 (°C)
<i>Exhaust mass flow rate</i>	77.3 (kg/s)
<i>Power Output</i>	15 (MW)
<i>Heat rate</i>	12,258 (kJ/kWh)

Analisis pola degradasi *performance* unit dibuat berdasarkan *historical* data deviasi efisiensi isentropik dan kapasitas aliran kompresor pada saat unit telah beroperasi 15,000 jam. Batasan nilai deviasi efisiensi kompresor yang diterima adalah -3% sedangkan untuk kapasitas aliran compressor adalah -6%. Apabila nilai deviasi telah tercapai maka unit dapat segera dilakukan overhaul atau *major inspection*.

Gambar 2.12 menunjukkan pola degradasi performance unit yang dibuat berdasarkan akhir periode inspeksi sebelumnya dijadikan sebagai data pembanding, dimana batasan nilai deviasi tercapai pada saat unit telah beroperasi 30,000 jam.



a

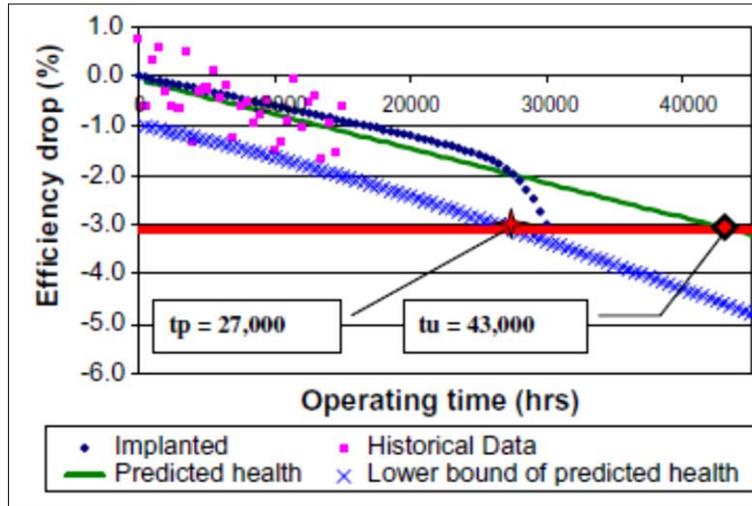


b

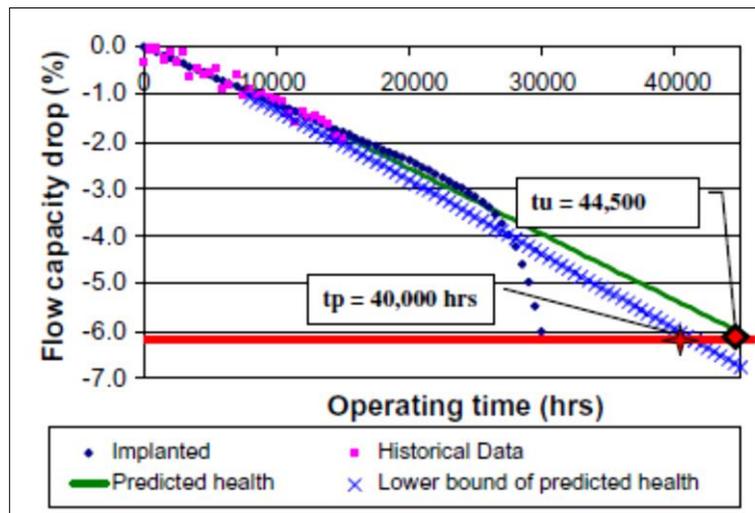
Gambar 2.12: Degradasi performance periode inspeksi sebelumnya (a) degradasi efisiensi (b) degradasi *flow capacity*

Prediksi kondisi kesehatan unit dibuat berdasarkan *historical* data dengan menggunakan regresi linear ataupun kuadratik untuk memperoleh *predicted useful life* ( $t_u$ ) sedangkan batas bawahnya menjadi *pessimistic useful life* ( $t_p$ ). Berdasarkan hasil regresi linear (Gambar 2.13), dari deviasi efisiensi diperoleh

nilai  $t_u = 43,000$  dan nilai  $t_p = 27,000$  sedangkan dari deviasi kapasitas flow diperoleh nilai  $t_u = 44,500$  dan nilai  $t_p = 40,000$ .



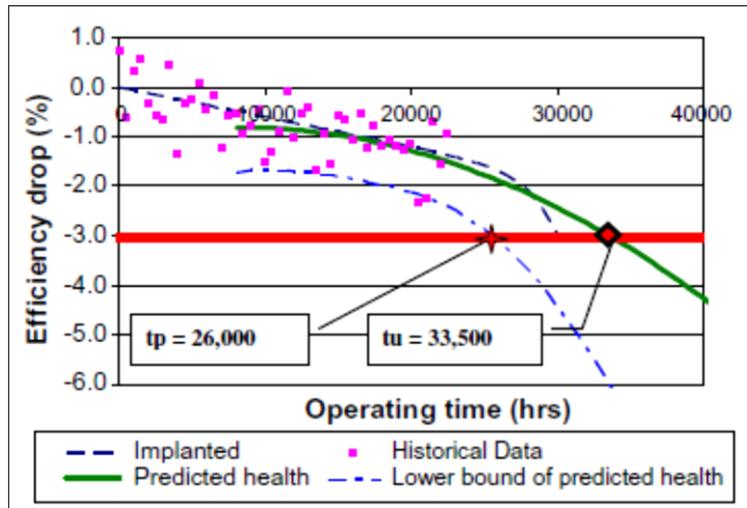
a



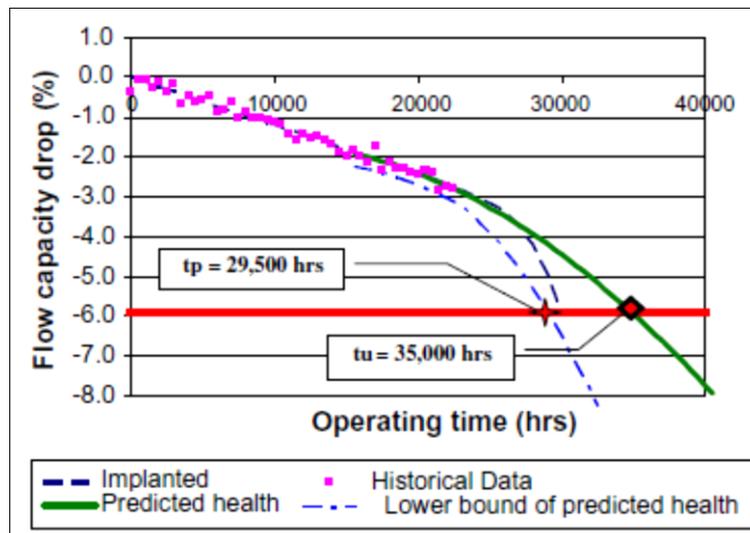
b

Gambar 2.13: Prognosa Hasil Regresi Linear (a) degradasi efisiensi (b) degradasi *flow capacity*

Hasil compability check dari regresi linear menunjukkan bahwa pola degradasi performance pada saat unit telah beroperasi 22,500 – 25,000 jam sudah tidak linear sehingga pemodelan prediksi harus dilanjutkan dengan regresi kuadratik dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 2.14.



a



b

Gambar 2.14: Prognosa Hasil Regresi Kuadratik (a) degradasi efisiensi (b) degradasi *flow capacity*

Berdasarkan hasil regresi kuadratik, dari deviasi efisiensi diperoleh nilai  $tu = 33,500$  dan nilai  $tp = 26,000$  sedangkan dari deviasi kapasitas flow diperoleh nilai  $tu = 35,000$  dan nilai  $tp = 29,500$ .

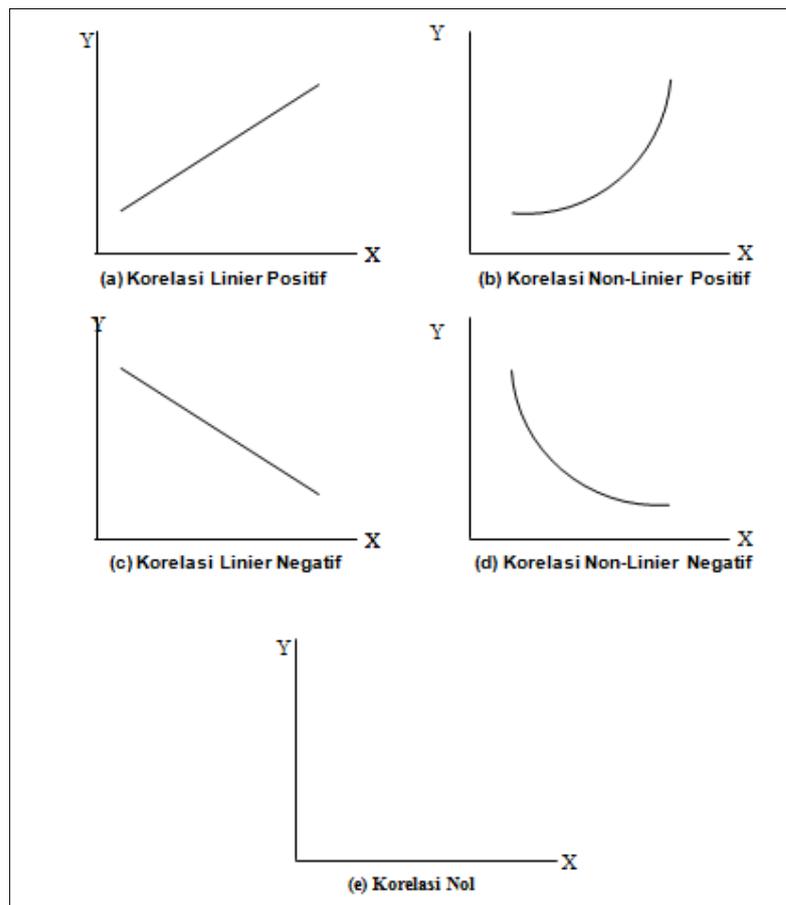
## 2.6 Teori regresi dan korelasi

Hubungan antar variabel dapat dideteksi melalui regresi dan korelasi. Secara konseptual analisis regresi dan regresi adalah berbeda. Regresi adalah studi

ketergantungan satu variabel (variabel tak bebas) pada satu atau lebih variabel lain (variabel yang menjelaskan), dengan maksud untuk menaksir dan/atau meramalkan nilai rata-rata hitung (*mean*) atau rata-rata (populasi) variabel tak bebas, dalam pengambilan sampel berulang-ulang dari variabel yang menjelaskan (*explanatory variable*). Tujuan dari regresi adalah sebagai berikut: pertama, untuk mengestimasi nilai rata-rata variabel tak bebas dan nilai rata-rata variabel bebas tertentu. Kedua, untuk menguji hipotesis mengenai sifat alamiah ketergantungan hipotesis sebagaimana yang disarankan oleh teori ekonomi, dan ketiga, untuk memprediksi atau meramalkan nilai rata-rata variabel tak bebas dan nilai rata-rata variabel bebas tertentu (Gujarati, 2003: 124).

Pada bagian lain, analisis korelasi adalah mengukur kekuatan (*strength*) atau tingkat hubungan (*degree of association*) antara dua variabel. Tingkat hubungan antara dua variabel disebut pula dengan korelasi sederhana (*simple correlation*), sementara tingkat hubungan antara tiga variabel atau lebih disebut dengan korelasi berganda (*multiple correlation*).

Korelasi dapat dibedakan menjadi dua, yaitu korelasi linier (*linear correlation*) dan korelasi non-linier (*nonlinear correlation*). Suatu korelasi dikatakan linier apabila hubungan dari semua titik dari X dan Y dalam suatu scatter diagram mendekati suatu garis (lurus). Sedangkan suatu korelasi dikatakan non-linier apabila semua titik dari X dan Y dalam suatu *scatter diagram* mendekati kurva. Baik korelasi linier maupun non-linier dapat bersifat positif, negatif maupun tidak terdapat korelasi (Koutsoyiannis, 1977: 31-32).



Gambar 2.15: Bentuk-bentuk korelasi linier dan non-linier

Dua variabel dikatakan mempunyai korelasi linier (dan non-linier) positif jika mereka atau kedua variabel tersebut mempunyai kecenderungan untuk berubah secara bersama-sama, yaitu jika satu variabel, katakanlah X naik, maka variabel lainnya, katakanlah Y akan naik pula dan sebaliknya. Misalnya dalam teori penawaran, ketika tingkat harga naik, maka jumlah barang yang ditawarkan akan naik, sebaliknya, ketika harga turun, maka jumlah barang yang ditawarkan akan turun pula.

Selanjutnya, dua variabel dikatakan mempunyai korelasi linier (dan non-linier) negatif jika mereka atau kedua variabel tersebut mempunyai kecenderungan untuk berubah secara berlawanan arah, yaitu jika variabel X naik, maka variabel Y akan turun dan sebaliknya. Misalnya dalam teori permintaan, jika tingkat harga naik, maka jumlah barang yang diminta akan turun, sebaliknya, ketika harga turun, maka jumlah barang yang diminta akan naik. Terakhir, dua variabel dikatakan mempunyai korelasi nol ketika mereka atau kedua variabel

tersebut mempunyai perubahan yang tidak saling berhubungan satu sama lainnya. Bentuk-bentuk korelasi linier dan non-linier ditunjukkan pada Gambar 2.15.

Berdasarkan uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa antara analisis regresi dan korelasi mempunyai perbedaan. Dalam analisis regresi, ada asimetris atau tidak seimbang (*asymmetry*) dalam memperlakukan variabel tak bebas dan variabel bebas. Variabel tak bebas diasumsikan bersifat stokastik atau acak. Pada bagian lain, variabel bebas diasumsikan mempunyai nilai yang tetap dalam pengambilan sampel secara berulang-ulang. Sementara itu, dalam analisis korelasi, baik variabel tak bebas maupun variabel bebas diperlakukan secara simetris atau seimbang di mana tidak ada perbedaan antara variabel tak bebas dengan variabel bebas.

### 2.6.1 Fungsi regresi populasi dan fungsi regresi sampel

Regresi memiliki dua pengertian fungsi regresi yang berbeda yaitu fungsi regresi populasi (*population regression function* = PRF) dan fungsi regresi sampel (*sample regression function* = SRF). Misalnya dalam estimasi fungsi permintaan barang (Y) dengan variabel penjelas tingkat harga (X). Hukum ekonomi menyatakan bahwa hubungan antara X dan Y adalah negatif, karena apabila tingkat harga naik permintaan akan barang akan turun. Dengan asumsi bahwa data X dan Y tersedia, maka nilai yang akan dicari adalah rata-rata pengharapan atau populasi (*expected or population mean*) atau nilai rata-rata populasi (*population average value of Y*) pada berbagai tingkat harga (X). Penggambaran dari model ini akan berbentuk garis regresi populasi (*population regression line* = PRL). PRL menyatakan bahwa nilai rata-rata dari variabel tak bebas Y akan berhubungan dengan setiap nilai variabel bebas X. Secara matematis, PRL dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E(Y | X_i) = \beta_0 + \beta_1 X_i \quad (2.4)$$

di mana  $E(Y | X_i)$  atau E (Y) adalah berarti rata-rata atau pengharapan akan nilai Y pada berbagai tingkat  $X_i$ ,  $\beta_0$  dan  $\beta_1$  masing-masing disebut pula dengan parameter atau koefisien regresi.  $\beta_0$  adalah koefisien intersep atau konstanta dan

$\beta_1$  adalah koefisien slope atau kemiringan. Koefisien slope mengukur tingkat perubahan rata-rata Y per unit akibat perubahan X.

Bentuk persamaan matematis PRL sebagaimana yang disajikan dalam persamaan (2.4) di atas fungsi regresi populasi (PRF) dalam bentuk linier. Selanjutnya, dari PRF, dapat pula dikembangkan konsep fungsi regresi sampel (SRF). Hal ini penting, karena dalam dunia nyata, data populasi sangat sulit untuk didapatkan atau ditemukan, sehingga salah satu langkah yang dapat dilakukan adalah mengambil sampel dari populasi tersebut. Adapun bentuk dari persamaan SRF adalah sebagai berikut:

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_1 X_i \quad (2.5)$$

di mana:

$\hat{Y}_i$  = Penaksir dari  $E(Y | X_i)$  atau penaksir rata-rata kondisional populasi.

$b_0$  dan  $b_1$  = Masing-masing adalah penaksir dari  $\beta_0$  dan  $\beta_1$ .

Dengan demikian SRF digunakan sebagai pendekatan untuk mengestimasi PRF. Penggunaan SRF harus memperhatikan kenyataan bahwa dalam dunia nyata terdapat unsur ketidakpastian (tidak ada hubungan yang pasti). Untuk mengakomodasi faktor ketidakpastian, maka dalam persamaan (2.4) ataupun (2.5) ditambahkan dengan pengganggu atau faktor acak ( $u_i$ ). Persamaan (2.4) dan (2.5) dapat ditulis kembali sebagai berikut:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + u_i \text{ (bentuk PRF Stokastik)} \quad (2.6)$$

$$Y_i = b_0 + b_1 X_i + u_i \text{ (bentuk SRF Stokastik)} \quad (2.7)$$

Selanjutnya persamaan (2.7) dapat diestimasi dengan menggunakan metode OLS. Dimasukkannya unsur pengganggu dalam persamaan (2.7) di atas tidak lain karena (Gujarati, 2003: 45-47):

1. Ketidakjelasan atau ketidaklengkapan teori (*vagueness of theory*).

Adanya ketidakjelasan/ketidaklengkapan teori yang menentukan perilaku variabel tak bebas (Y). Misalnya secara teoritis peneliti hanya mengetahui bahwa yang mempengaruhi pengeluaran konsumsi (Y) adalah pendapatan mingguan ( $X_1$ ) saja. Padahal sebenarnya masih terdapat beberapa variabel

lain yang mempengaruhi  $Y$ . Variabel-variabel yang tidak tercakup dalam model akan diproksi melalui  $u_i$ .

2. Ketidakterediaan data (*unavailability of data*).

Ketika seorang peneliti tahu bahwa variabel yang mempengaruhi  $Y$  tidak hanya dipengaruhi oleh  $X_1$ , tetapi juga ditentukan oleh tingkat kesejahteraan seseorang ( $X_2$ ) dan lingkungan sekitar ( $X_3$ ). Maka fungsi konsumsi  $Y = f(X_1)$ , berubah menjadi  $Y = f(X_1, X_2, X_3)$ . Namun permasalahan yang muncul adalah data  $X_2$  dan  $X_3$  sangat sulit untuk diperoleh, sehingga mungkin kedua variabel tersebut akan dikeluarkan dari model dan fungsi konsumsi yang akan diestimasi kembali menjadi  $Y = f(X_1)$ . Dalam kasus ini,  $u_i$  bisa digunakan sebagai pengganti variabel yang dikeluarkan atau tidak dimasukkan dalam model tersebut.

3. Variabel pusat versus variabel pinggiran (*core variable versus peripheral variable*).

Misalnya, dalam contoh konsumsi-pendapatan atau  $Y = f(X_1)$ , juga diasumsikan bahwa jumlah anak ( $X_4$ ), jenis kelamin ( $X_5$ ), agama ( $X_6$ ), dan tingkat pendidikan ( $X_7$ ) berpengaruh terhadap tingkat konsumsi. Tetapi pada pihak lain, sangat mungkin bahwa pengaruh  $X_4$ ,  $X_5$ ,  $X_6$ ,  $X_7$  sangat kecil, sehingga dari segi kepraktisan, pertimbangan biaya dan keserhanaan, keempat variabel tersebut tidak dimasukkan dalam model.  $u_i$  diharapkan bisa digunakan sebagai pengganti variabel yang tidak dimasukkan dalam model

4. Kesalahan manusiawi (*intrinsic randomness in human behavior*).

Kesalahan manusiawi menyebabkan tetap terdapat kemungkinan suatu variabel tidak bisa dicakup dalam model. Dalam kasus ini,  $u_i$  dapat digunakan sebagai pengganti variabel yang tidak dimasukkan dalam model tersebut.

5. Kurangnya variabel pengganti (*poor proxy variables*).

Walaupun dalam model regresi klasik dinyatakan bahwa variabel  $Y$  dan  $X$  diukur secara akurat, namun dalam aplikasinya di lapangan, mungkin akan terjadi kesalahan pengukuran (*error of measurement*), kesulitan pengumpulan data atau kesulitan menentukan proksi terhadap variabel yang akan diukur. Misalnya, teori konsumsi dari Milton Friedman yang mengatakan bahwa konsumsi permanen (*permanent consumption* =  $Y_p$ ) sebagai fungsi dari tingkat pendapatan permanen (*permanent income* =  $X_p$ ). Permasalahannya adalah data untuk kedua variabel tersebut tidak dapat diamati dalam dunia nyata, sehingga ketika ingin mengestimasi dengan menggunakan fungsi konsumsi Friedman, kedua variabel yang disebutkan di atas didekati atau diganti dengan data seperti tingkat konsumsi sekarang (*current consumption* =  $X$ ) dan tingkat pendapatan sekarang (*current income* =  $Y$ ). Namun, perlu diingat bahwa  $Y$  dan  $X$  mungkin tidak sama dengan  $Y_p$  dan  $X_p$  sehingga di sini akan timbul masalah kesalahan pengukuran. Oleh karena itu, dengan dimasukkannya unsur  $u_i$  dalam model diharapkan bisa digunakan sebagai representasi dari adanya kesalahan pengukuran.

6. Prinsip kesederhanaan (*principle of parsimony*).

Ketika seorang peneliti hendak mengestimasi suatu model, maka model regresi tersebut diusahakan sesederhana mungkin. Misalnya seorang peneliti ingin menjelaskan perilaku pengeluaran konsumsi ( $Y$ ), dengan menggunakan dua atau tiga variabel bebas. Namun teori yang berkaitan dengan pengeluaran konsumsi tidak cukup kuat untuk menjelaskan mana variabel yang secara substansial harus dimasukkan untuk mengestimasi fungsi pengeluaran konsumsi tersebut maka peneliti dapat membentuk model pengeluaran konsumsi sesederhana mungkin, karena unsur  $u_i$  akan merepresentasikan variabel-variabel lain yang tidak dimasukkan tersebut.

7. Kesalahan bentuk fungsi (*wrong functional form*).

Ketika peneliti ingin mengestimasi  $Y = f(X)$  di mana fungsi ini secara teoritis benar dan data yang akan digunakan tersedia, masalah yang sering

timbul selanjutnya adalah menentukan bentuk fungsi secara tepat, apakah linier ataukah non-linier. Terlebih lagi dalam kasus regresi berganda. Oleh karena itu, dengan dimasukkannya unsur  $u_i$  dalam model diharapkan bisa mengeliminasi kesalahan pemilihan bentuk fungsi regresi.

### 2.6.2 Pengertian istilah linier

Istilah atau pengertian linieritas dalam ekonometrika sangat penting, di mana karena: pertama, banyak hubungan-hubungan dalam ekonomi dan hubungan-hubungan dalam ilmu sosial secara alamiah adalah linier. Kedua, penerapan asumsi linieritas hanya terhadap parameter, bukan terhadap variabel model. Ketiga, ketika suatu model ditransformasi dalam model linier, maka bentuk transformasi seperti dalam bentuk logaritma dapat dipakai dalam beberapa kasus, dan keempat, dengan asumsi linieritas, beberapa fungsi yang halus (*any smooth function*) dapat didekati dengan tingkat ketepatan yang lebih besar ketika menggunakan bentuk fungsi linier (Intriligator dkk, 1996: 20-21).

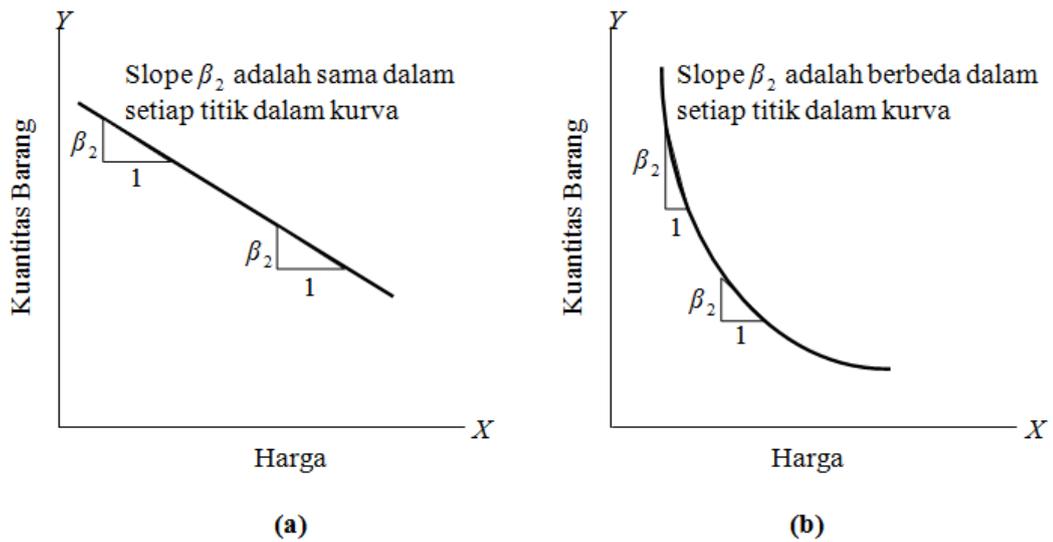
### 2.6.3 Linieritas dalam variabel

Arti pertama dan mungkin lebih alamiah dari linieritas adalah bahwa nilai rata-rata kondisional dari variabel Y merupakan fungsi linier terhadap  $X_i$  sebagaimana disajikan dalam persamaan (2.4) atau (2.6) ataupun dalam persamaan (2.5) dan (2.7). Sedangkan bentuk fungsi non-linier dalam variabel antara lain adalah :

$$E(Y) = \beta_0 + \beta_1 X_i^2 \quad (2.8)$$

$$E(Y) = \beta_0 + \beta_1 (1/X_i) \quad (2.9)$$

Persamaan (2.8) dan (2.9) di atas dinamakan persamaan yang tidak linier, karena persamaan (2.8) berpangkat 2, sementara persamaan (2.9) dinyatakan dalam bentuk kebalikan (inverse).



Gambar 2.16: Kurva Permintaan Linier Dan Non-Linier

Sebagaimana disajikan dalam gambar (2.16), untuk persamaan regresi (2.4), slope (tingkat perubahan dalam  $E(Y)$ ) adalah tetap sama pada berbagai titik  $X$ . Akan tetapi misalnya untuk persamaan (2.9), tingkat perubahan rata-rata dari  $Y$  adalah berbeda-beda atau bervariasi pada setiap titik  $X$  dalam garis regresi. Dengan kata lain, suatu fungsi  $Y = f(X)$  dikatakan linier, jika  $X$  memiliki pangkat satu dan/atau tidak dikalikan atau dibagi dengan variabel lain.

#### 2.6.4 Linieritas dalam parameter

Linieritas parameter terjadi jika rata-rata kondisional dari variabel tak bebas merupakan suatu fungsi linier terhadap parameter  $\beta$ ; fungsi tadi mungkin linier atau tidak linier dalam variabel  $X$ . Dalam arti lain, bahwa suatu fungsi dikatakan linier dalam parameter, kalau  $\beta_1$  bersifat pangkat 1. Dengan definisi ini, persamaan (2.8) dan (2.9) di atas merupakan model linier dalam parameter karena  $\beta_0$  dan  $\beta_1$  adalah linier.

Lebih lanjut, bentuk fungsi persamaan (2.10) tidak dikatakan sebagai fungsi linier, karena  $\beta_1$  tidak berpangkat 1.

$$E(Y) = \beta_0 + \beta_1^2 X_i \tag{2.10}$$

Dari dua interpretasi linieritas di atas, linieritas dalam parameter adalah relevan untuk pengembangan teori regresi. Dalam ekonometrika, seringkali

dijumpai bahwa regresi linier selalu diartikan dengan suatu regresi dalam parameter  $\beta$ ; regresi tadi mungkin linier atau tidak linier dalam variabel penjelas  $X$ .

### 2.6.5 Regresi linier bersyarat sederhana dan berganda

Model linier (bersyarat) sederhana adalah regresi linier yang hanya melibatkan dua variabel, satu variabel tak bebas serta satu variabel bebas. Sedangkan apabila variabel tak bebas dipengaruhi oleh lebih dari satu variabel bebas ( $X$ ), katakanlah  $X_2$  dan  $X_3$ , maka bentuk persamaan regresi tersebut dinamakan dengan regresi linier berganda (*multiple linear regression*). Secara matematis, regresi linier berganda dapat ditulis sebagai berikut:

$$E(Y) = \beta_1 + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} \quad (2.11)$$

di mana  $E(Y) = E(Y | X_2, X_3)$

Dalam bentuk PRF yang stokastik dari persamaan (2.11) adalah :

$$\begin{aligned} Y_i &= \beta_1 + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + u_i \\ &= E(Y) + u_i \end{aligned} \quad (2.12)$$

Persamaan (2.12) menyatakan bahwa beberapa nilai individual  $Y$  terdiri dari dua komponen, yaitu:

1. Komponen sistematis atau deterministik,  $(\beta_1 + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i})$  di mana secara sederhana merupakan nilai rata-rata  $E(Y)$  pada titik-titik garis regresi populasi.
2. Komponen non-sistematis atau acak,  $u_i$  yang ditentukan oleh faktor-faktor lain di luar  $X_2$  dan  $X_3$ .

### 2.6.6 Metode kuadrat terkecil dalam model regresi linier sederhana

Ada berbagai metode yang dapat digunakan untuk mengestimasi parameter-parameter hubungan ekonomi dari SRF sebagai penaksir yang benar untuk PRF. Salah satunya adalah metode kuadrat terkecil (*Ordinary Least Squares* = OLS) atau sering pula disebut dengan metode kuadrat terkecil klasik

(*Classical Least Squares* = CLS). Metode ini dikemukakan oleh Carl Friedrich Gauss, seorang ahli matematik Jerman.

Beberapa alasan yang mendasari mengapa digunakan OLS/CLS, yaitu (Koutsoyiannis 1977: 48):

1. Estimasi parameter yang diperoleh dengan menggunakan OLS mempunyai beberapa ciri optimal.
2. Prosedur perhitungan dari OLS sangat sederhana dibandingkan dengan metode ekonometrika yang lainnya serta kebutuhan data tidak berlebihan.
3. OLS dapat digunakan dalam range hubungan ekonomi yang luas dengan tingkat ketepatan yang memuaskan.
4. Mekanisme perhitungan OLS secara sederhana dapat dimengerti.
5. OLS merupakan komponen vital bagi banyak tehnik ekonometri yang lain.

Untuk dapat memahami pendekatan Gauss ini, misalkan akan diestimasi PRF untuk model regresi sederhana berikut ini (Gujarati, 1995: 58-65):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + u_i \quad (2.13)$$

Oleh karena PRF dalam persamaan (2.13) di atas tidak dapat diamati secara langsung, maka didekati dengan SRF dengan bentuk persamaan berikut:

$$Y_i = b_0 + b_1 X_i + e_i \quad (2.14)$$

di mana : *residual*,  $e_i$  merupakan perbedaan antara nilai  $Y$  aktual dengan nilai  $Y$  yang diestimasi atau  $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$

$$e_i = Y_i - b_0 - b_1 X_i \quad (2.15)$$

Nilai  $b_0$  dan  $b_1$  dikatakan sebagai penaksir terbaik dari  $\beta_0$  dan  $\beta_1$  apabila memiliki nilai  $e_i$  yang sekecil mungkin. Dengan menggunakan metode estimasi yang biasa dipakai dalam ekonometrika, yaitu OLS, pemilihan  $b_0$  dan  $b_1$  dapat dilakukan dengan memilih nilai jumlah kuadrat *residual* (*residual sum of squared*=RSS),  $\sum e_i^2$  yang paling kecil. Atau dapat ditulis sebagai berikut:

$$\text{Minimisasi: } \sum e_i^2 = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum (Y_i - b_0 - b_1 X_i)^2 \quad (2.16)$$

Dengan menggunakan metode turunan parsial (*partial differentiation*), diperoleh:

$$\partial \sum e_i^2 / \partial b_0 = 2 \sum (Y_i - b_0 - b_1 X_i)(-1) \quad (2.17)$$

$$\partial \sum e_i^2 / \partial b_1 = 2 \sum (Y_i - b_0 - b_1 X_i)(-X_i) \quad (2.18)$$

Dengan optimasi kondisi order pertama sama dengan nol, maka diperoleh:

$$\sum Y_i = n b_0 + b_1 \sum X_i \quad (2.19)$$

$$\sum Y_i X_i = b_0 \sum X_i + b_1 \sum X_i^2 \quad (2.20)$$

di mana  $n$  adalah jumlah sampel. Persamaan simultan ini dikenal sebagai persamaan normal (kuadrat terkecil).

Dari (2.19) dan (2.20) di atas, belum diketahui besarnya nilai  $b$  (nilai koefisien  $b_0$  dan  $b_1$ ). Untuk menyelesaikan permasalahan ini, maka dapat ditempuh dengan cara berikut:

$$b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X} \quad (2.21)$$

$$b_0 = \frac{\sum X_i^2 \sum Y_i - \sum X_i \sum X_i Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

di mana  $b_0$  adalah nilai penaksir dari  $\beta_0$ . Selanjutnya,  $b_1$  sebagai nilai penaksir dari  $\beta_1$  adalah dicari sebagai berikut:

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (2.22) \\ &= \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \\ &= \frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2} \end{aligned}$$

di mana  $\bar{X}$  dan  $\bar{Y}$  adalah rata-rata sampel dari  $X$  dan  $Y$  dan  $x_i = (X_i - \bar{X})$  dan  $y_i = (Y_i - \bar{Y})$ .

Penaksir yang diperoleh dalam persamaan di atas di kenal sebagai penaksir OLS. Ciri-ciri penaksir OLS adalah sebagai berikut:

1. Penaksir dinyatakan semata-mata dalam besaran yang bisa diamati, yaitu besaran sampel.

2. Penaksir merupakan penaksir titik yaitu dengan sampel tertentu, tiap penaksir akan memberikan hanya satu nilai (titik) tunggal parameter populasi yang relevan.
3. Sekali estimasi kuadrat terkecil diperoleh dari data yang dimiliki, maka garis regresi sampel dapat dengan mudah diperoleh. Garis regresi yang diperoleh mempunyai sifat-sifat sebagai berikut:
  - 1) Garis regresi tadi melalui rata-rata sampel  $Y$  dan  $X$ , yang dibuktikan oleh  $\bar{Y} = b_0 - b_1 \bar{X}$ .
  - 2) Nilai rata-rata  $Y$  yang diestimasi  $Y = \hat{Y}_i$  adalah sama dengan nilai rata-rata  $Y$  yang sebenarnya karena  $Y = \bar{Y}$ , di mana dalam kenyataannya nilai  $\sum (X_i - \bar{X}) = 0$ .
  - 3) Nilai rata-rata *residual*,  $e_i = 0$ .
  - 4) Nilai *residual*,  $e_i$  tidak berkorelasi dengan nilai estimasi  $Y_i, \hat{Y}_i$ .
  - 5) Nilai *residual*,  $e_i$  tidak berkorelasi dengan  $X_i$ , yaitu  $\sum e_i X_i = 0$ .

### 2.6.7 Asumsi model regresi linier klasik: metode kuadrat terkecil

Metode kuadrat terkecil yang dikemukakan oleh Gauss mempunyai beberapa asumsi dan beberapa sifat statistik yang sangat kuat sehingga membuat metode kuadrat terkecil menjadi metode analisis regresi yang paling kuat (powerful) dan populer, baik dalam kasus regresi sederhana maupun berganda. Setidaknya ada 10 asumsi regresi linier klasik, yaitu (Gujarati 2003: 65-75):

1. Model regresi adalah linier, dalam hal ini adalah model regresi linier dalam parameter.
2. Nilai  $X$  adalah tetap di dalam sampel yang dilakukan secara berulang-ulang. Dengan kata lain,  $X$  adalah non-stokastik (deterministik).
3. Nilai rata-rata dari unsur faktor pengganggu adalah sama dengan nol, atau  $u_i = 0$ , secara teknis dapat ditulis sebagai  $E(u_i^2 | X_i) = 0$ .

4. Homokedastisitas atau varian  $u_i$  adalah sama untuk semua pengamatan. Hal tersebut berarti bahwa varian kondisional  $u_i$  bersifat identik. Secara teknis dapat ditulis sebagai  $E(u_i^2) = \sigma^2$ .
5. Tidak ada otokorelasi antar unsur pengganggu. Misalkan diketahui ada dua nilai variabel  $X$ , yaitu  $X_i$  dan  $X_j$  ( $i \neq j$ ), korelasi antara kedua unsur pengganggu  $u_i$  dan  $u_j$  ( $i \neq j$ ), adalah sama dengan nol -  $\text{cov}(u_i u_j | X_i X_j) = E(u_i u_j) = 0$ .
6. Nilai kovarian antara  $u_i$  dan  $X_i$  adalah sama dengan nol -  $\text{cov}(u_i, X_i) = E(u_i X_i) = 0$ .
7. Jumlah observasi atau pengamatan  $n$  harus lebih besar daripada jumlah parameter yang diobservasi.
8. Nilai  $X$  adalah dapat bervariasi (*variability*). Artinya, nilai  $X$  untuk sampel tertentu tidak harus sama dengan atau semua sampel.
9. Spesifikasi model regresi harus benar, sehingga tidak terjadi *specification bias or error*
10. Tidak ada multikolinieritas sempurna antar variabel penjelas

### 2.6.8 Ciri-ciri penaksir metode kuadrat terkecil

Teorema Gauss-Markov adalah teorema yang melekat dalam metode kuadrat terkecil (OLS). Teorema ini menyatakan bahwa apabila semua asumsi linier klasik dipenuhi, maka akan ditemukan model penaksir yang tidak bias, linier dan merupakan penaksir terbaik (*best linear unbiased estimator = BLUE*) (Gujarati, 2003: 79). Penaksir OLS  $b_0$  dan  $b_1$  bersifat BLUE mengandung arti berikut :

1. *Linear*.  $b_0$  dan  $b_1$  merupakan suatu fungsi linier dari variabel acak  $Y$  di dalam model regresi, sebagaimana yang ditunjukkan dalam persamaan (2.18) dan (2.19).
2. *Unbiased*,  $b_0$  dan  $b_1$  tidak bias, terutama dalam regresi dengan menggunakan sampel besar, sehingga penaksir parameter diperoleh dari

sampel besar kira-kira lebih mendekati nilai parameter yang sebenarnya.

Atau secara teknis ditulis sebagai  $E(b_0) = \beta_0$  dan  $E(b_1) = \beta_1$

3. *Efficient estimator*.  $b_0$  dan  $b_1$  mempunyai varian yang minimum atau penaksir yang efisien, yaitu bahwa:  $\text{var}(b_0)$  [ $\text{var}(b_1)$ ] adalah lebih kecil dibandingkan dengan beberapa penaksir  $\beta_0$  [ $\beta_1$ ] lainnya.

### 2.6.9 Metode kuadrat terkecil dalam model regresi linier berganda

Langkah pertama untuk mengestimasi persamaan (2.12) dengan menggunakan metode OLS adalah membentuk persamaan SRF berikut :

$$Y_i = b_1 + b_2 X_{2i} + b_3 X_{3i} + u_i \quad (2.23)$$

di mana  $b_1$ ,  $b_2$  dan  $b_3$  masing-masing adalah nilai penaksir  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  dan  $\beta_3$ .

Persamaan (2.23) apabila dinyatakan dalam bentuk persamaan garis regresi populasi (PRL) yang diestimasi adalah sebagai berikut:

$$\hat{Y}_i = b_1 + b_2 X_{2i} + b_3 X_{3i} + u_i \quad (2.24)$$

Langkah berikutnya adalah memilih nilai jumlah kuadrat *residual* (=RSS),  $\sum e_i^2$ , yang sekecil mungkin. Untuk itu persamaan (2.23) harus dinyatakan dengan bentuk persamaan berikut :

$$e_i = Y_i - b_1 - b_2 X_{2i} - b_3 X_{3i} \quad (2.25)$$

RSS dari persamaan (2.25) adalah:

$$\text{RSS: } \sum e_i^2 = \sum (Y_i - b_1 - b_2 X_{2i} - b_3 X_{3i})^2 \quad (2.26)$$

RSS dapat diminimisasikan, di mana secara sederhana merupakan jumlah kuadrat perbedaan antara nilai aktual  $Y_i$  dengan nilai estimasi  $\hat{Y}_i$ , dengan menggunakan metode turunan parsial (*partial differentiation*)

$$\frac{\partial \sum e_i^2}{\partial \sum b_1} = 2 \sum (Y_i - b_1 - b_2 X_{2i} - b_3 X_{3i})(-1) = 0 \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial \sum e_i^2}{\partial \sum b_2} = 2 \sum (Y_i - b_1 - b_2 X_{2i} - b_3 X_{3i})(-X_{2i}) = 0 \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial \sum e_i^2}{\partial \sum b_3} = 2 \sum (Y_i - b_1 - b_2 X_{2i} - b_3 X_{3i})(-X_{3i}) = 0 \quad (2.29)$$

Dengan optimasi kondisi order pertama sama dengan nol, maka akan diperoleh:

$$\bar{Y} = b_1 + b_2 \bar{X}_2 + b_3 \bar{X}_3 \quad (2.30)$$

$$\sum Y_i X_{2i} = b_1 \sum X_{2i} + b_2 \sum X_{2i}^2 + b_3 \sum X_{2i} X_{3i} \quad (2.31)$$

$$\sum Y_i X_{3i} = b_1 \sum X_{3i} + b_2 \sum X_{2i} X_{3i} + b_3 \sum X_{3i}^2 \quad (2.32)$$

di mana jumlah sampel terletak antara 1 sampai  $n$ .

Dari persamaan (2.30) sampai (2.32) ada tiga hal yang tidak diketahui, yaitu  $b_1$ ,  $b_2$  dan  $b_3$ , sedangkan variabel yang diketahui adalah  $Y$  dan  $X$ . Oleh karena itu, harus dicari tiga nilai yang tidak diketahui tersebut. Dengan manipulasi aljabar, diperoleh penaksir OLS untuk  $b$ :

$$b_1 = \bar{Y} - b_2 \bar{X}_2 - b_3 \bar{X}_3 \quad (2.33)$$

$$b_2 = \frac{(\sum y_i x_{2i})(\sum x_{3i}^2) - (\sum y_i x_{3i})(\sum x_{2i} x_{3i})}{(\sum x_{2i}^2)(\sum x_{3i}^2) - (\sum x_{2i} x_{3i})^2} \quad (2.34)$$

$$b_3 = \frac{(\sum y_i x_{3i})(\sum x_{2i}^2) - (\sum y_i x_{2i})(\sum x_{2i} x_{3i})}{(\sum x_{2i}^2)(\sum x_{3i}^2) - (\sum x_{2i} x_{3i})^2} \quad (2.35)$$

di mana  $\bar{X}$  dan  $\bar{Y}$  adalah rata-rata sampel dari  $X$  dan  $Y$  dan  $x_i = (X_i - \bar{X})$  dan  $y_i = (Y_i - \bar{Y})$ .

#### 2.6.10 Menghitung nilai t statistik

Parameter yang diperoleh dalam estimasi OLS, masih perlu dipertanyakan apakah bersifat signifikan atau tidak. Uji signifikansi dimaksudkan untuk mengverifikasi kebenaran atau kesalahan hipotesis nol yang dibuat (Gujarati, 2003: 129). Salah satu cara untuk menguji hipotesis yang melihat signifiknasi pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen adalah uji t. Secara sederhana, untuk menghitung nilai t statistik dari  $b_2$  dalam model regresi ganda adalah :

$$t \text{ statistik} = \frac{b_2 - B_2}{se(b_2)} \quad (2.36)$$

di mana  $B_2 = \beta_2$ . Jika dimisalkan hipotesis nol ( $H_0$ ):  $B_2 = B_2^*$ , maka persamaan (2.36) dapat ditulis:

$$t \text{ statistik} = \frac{b_2 - B_2^*}{se(b_2)} \quad (2.37)$$

Dengan menggunakan uji t dalam pembuatan keputusan, maka setidaknya ada tiga pengetahuan yang sangat dibutuhkan, yaitu:

1. Tingkat derajat kebebasan (degree of freedom). Besar degree of freedom (df) ditentukan berdasar  $(n - k)$ , dimana  $n$  adalah jumlah observasi dan  $k$  adalah jumlah parameter termasuk konstanta. Sehingga bila dalam regresi sederhana terdapat satu variable penjelas dan satu konstanta maka  $df = n-2$ , sedangkan dalam regresi berganda dengan dua variable penjelas maka  $df = n-3$
2. Tingkat signifikansi ( $\alpha$ ) dapat dipilih pada kisaran 1 %; 5 % atau 10 %.
3. Apakah menggunakan uji dua sisi atautkah satu sisi. Penetapan uji satu atau dua sisi tergantung pada hipotesis yang dibuat oleh peneliti. Apabila peneliti menduga bahwa variabel penjelas memilih arah pengaruh yang pasti, misalnya negatif atau positif maka, uji t yang digunakan adalah uji satu sisi ( $H_0 : b_2 > 0$ , atau  $H_0 : b_2 < 0$ ). Sedangkan bila tidak diketahui secara pasti arah pengaruhnya maka digunakan uji dua sisi dengan  $H_0 : b_2 = 0$ .

Apabila nilai t statistik lebih besar dibandingkan dengan nilai t tabel (kritisnya), maka hipotesis nol yang mengatakan bahwa  $b_2 = 0$  ditolak. Begitu pula sebaliknya, apabila nilai t statistik lebih kecil dibandingkan dengan nilai t tabel, maka hipotesis nol yang mengatakan bahwa  $b_2 = 0$  harus ditolak.

### **2.6.11 Koefisien determinasi: suatu ukuran kebaikan-kesesuaian**

Uji kebaikan-kesesuaian (*goodness of fit*) garis regresi terhadap sekumpulan data merupakan kelengkapan lain dari estimasi OLS. Tujuan dari uji *goodness of fit* adalah untuk mengetahui sejauh mana garis regresi sampel cocok dengan data. Hal ini berkaitan dengan harapan kita agar semua pengamatan terletak pada garis regresi, sehingga akan diperoleh kesesuaian yang sempurna.

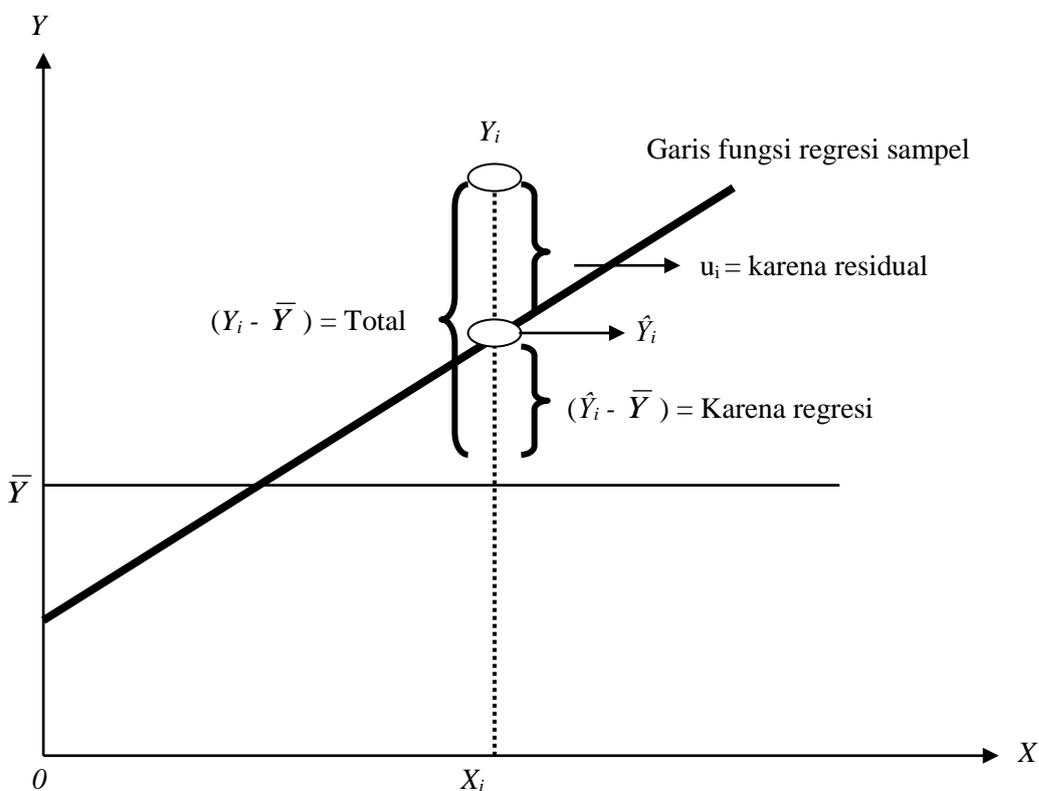
Kesesuaian semacam itu tidak akan terjadi karena adanya unsur pengganggu menyebabkan tidak mungkin diperoleh nilai kesesuaian yang sempurna.

Untuk lebih memudahkan, nilai koefisien determinasi regresi dua variabel dinamakan dengan  $r^2$ , sementara untuk nilai koefisien determinasi regresi berganda dinamakan dengan  $R^2$ . Nilai  $r^2$ , dapat diamati dari persamaan berikut ini:

$$Y_i = \hat{Y}_i + e_i \quad (2.38)$$

Misalkan persamaan (2.38) disajikan dalam bentuk yang sedikit berbeda, tetapi ekuivalen dengan bentuk sebagaimana, disajikan dalam gambar (2.17):

$(Y_i - \bar{Y})$	$(\hat{Y}_i - \bar{Y})$	$(Y_i - \hat{Y}_i)$
Variasi dalam $Y_i$ dari nilai rata-ratanya	Variasi dalam $Y_i$ yang dijelaskan oleh $X (= \hat{Y}_i)$ di sekitar nilai rata-ratanya	Yang tidak dapat dijelaskan atau variasi <i>residual</i>
	(Catatan: $\bar{Y} = \bar{\hat{Y}}$ )	



Gambar 2.17: Perincian variasi  $Y_i$  ke dalam dua bagian

Persamaan (2.38), bila ditulis dalam bentuk simpangan adalah sebagai berikut:

$$y_i = \hat{y}_i + e_i \quad (2.39)$$

Dengan mengkuadratkan kedua sisi dan menjumlahkannya untuk semua sampel, maka akan diperoleh:

$$\sum y_i^2 = \sum \hat{y}_i^2 + \sum e_i^2 \quad (2.40)$$

Karena  $\hat{y}_i = b_2 x_i$ , maka persamaan (2.37) adalah ekuivalen dengan

$$\sum y_i^2 = b_2^2 \sum x_i^2 + \sum e_i^2 \quad (2.41)$$

Berbagai jumlah kuadrat yang muncul dalam persamaan (2.40) dapat dijelaskan sebagai berikut:

1.  $\sum y_i^2$  = total variasi nilai  $Y$  sebenarnya di sekitar rata-rata sampelnya, yang bisa disebut sebagai jumlah kuadrat total (*total sum of squares* = TSS).
2.  $\sum \hat{y}_i^2$  = variasi nilai  $Y$ , yang diestimasi di sekitar rata-ratanya  $(\bar{\hat{Y}} - \bar{Y})$ , yang bisa disebut sebagai jumlah kuadrat karena regresi, yaitu karena variabel yang menjelaskan, atau dijelaskan oleh regresi, atau sering pula disebut dengan jumlah kuadrat yang dijelaskan (*explained sum of squares* = ESS).
3.  $\sum e_i^2$  = *residual* atau variasi yang tidak dapat dijelaskan (*unexplained*) dari nilai  $Y$  di sekitar garis regresi atau sering pula disebut dengan jumlah kuadrat residual (*residual sum of squares* = RSS).

Dengan demikian, persamaan (2.41) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\text{TSS} = \text{ESS} + \text{RSS} \quad (2.42)$$

Persamaan (2.42) menunjukkan bahwa total variasi dalam nilai  $Y$  yang diamati di sekitar nilai rata-ratanya dapat dipisahkan ke dalam dua bagian, yaitu sebagian diakibatkan oleh garis regresi dan sebagian lagi disebabkan oleh kekuatan acak (*random*) karena tidak semua pengamatan  $Y$  yang sebenarnya terletak pada garis yang disesuaikan.

Sekarang, dengan membagi persamaan (2.42) dengan TSS pada kedua sisinya, maka akan diperoleh:

$$1 = \frac{ESS}{TSS} + \frac{RSS}{TSS} \quad (2.43)$$

Sekarang, dimisalkan  $r^2$  adalah:

$$r^2 = \frac{ESS}{TSS} \quad (2.44)$$

Dengan cara lain,  $r^2$  dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$1 = r^2 + \frac{RSS}{TSS} \quad (2.45)$$

$$r^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} \quad (2.46)$$

Dengan cara yang sama, nilai  $R^2$  untuk model regresi berganda dapat dihitung sebagai berikut:

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} = \frac{b_2 \sum y_i x_{2i} + b_3 \sum y_i x_{3i}}{\sum y_i^2} \quad (2.47)$$

$$R^2 = \frac{b_2 \sum y_i x_{2i} + b_3 \sum y_i x_{3i}}{\sum y_i^2 - b_2 \sum y_i x_{2i} - b_3 \sum y_i x_{3i}} = \frac{b_2 \sum y_i x_{2i} + b_3 \sum y_i x_{3i}}{\sum y_i^2} \quad (2.48)$$

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} = \frac{\sum e_i^2}{\sum y_i^2} \quad (2.49)$$

Besaran  $r^2$  ( $R^2$ ) yang didefinisikan di atas dikenal dengan koefisien determinasi (coefficient of determination) dan biasanya digunakan untuk mengukur kebaikan-sesuai suatu garis regresi. Nilai atau besaran  $r^2$  ( $R^2$ ) hanyalah salah satu dan bukan satu-satunya kriteria untuk memilih dan/atau mengukur ketepatan suatu regresi atau model (Insukindro, 1998: 1-2). Secara verbal adalah  $r^2$  ( $R^2$ ) mengukur yang didefinisikan proporsi atau prosentase dari variasi variabel Y mampu dijelaskan oleh variasi (himpunan) variabel X.

Lebih lanjut, berdasarkan uraian di atas, maka perlu diketahui berapa ciri atau sifat dari  $r^2$  ( $R^2$ ) yaitu:

1. Nilai  $r^2$  ( $R^2$ ) merupakan besaran non negatif, karena berdasarkan formulasi persamaan (2.46) misalnya, tidak mungkin  $r^2$  ( $R^2$ ) akan bernilai negatif.
2. Nilai  $r^2$  ( $R^2$ ) adalah terletak  $0 \leq r^2$  ( $R^2$ )  $\leq 1$ . Suatu nilai  $r^2$  ( $R^2$ ) sebesar 1 berarti suatu kesesuaian sempurna (hampir tidak pernah terjadi), sedangkan nilai  $r^2$  ( $R^2$ ) sebesar nol berarti tidak ada hubungan antara variabel tak

bebas dengan variabel yang menjelaskan (variabel bebas) atau prosentase dari variasi variabel  $Y$  tidak mampu dijelaskan oleh variasi dari variabel  $X$ .

### 2.6.12 Koefisien korelasi

Koefisien korelasi,  $r$  untuk regresi sederhana dan  $R$  untuk regresi berganda mempunyai hubungan yang sangat erat dengan  $r^2$  ( $R^2$ ), walaupun secara konseptual berbeda. Koefisien korelasi mengukur hubungan antara variabel tak bebas ( $Y$ ) dengan variabel bebas ( $X$ ). Formulasi dari  $r$  ( $R$ ) adalah sebagai berikut:

$$r(R) = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2.50)$$

$$r(R) = \frac{\sum x_i y_i}{\sqrt{\sum x_i^2 \sum y_i^2}} \quad (2.51)$$

Atau dapat juga dilakukan dengan mengambil nilai akar  $r^2$  ( $R^2$ ).

$$r = \pm \sqrt{r^2} \quad (2.52)$$

Ada beberapa sifat  $r$  ( $R$ ), yaitu:

1. Nilai  $r$  ( $R$ ) dapat positif atau negatif, tandanya tergantung pada tanda faktor pembilang dari persamaan (2.47), yaitu mengukur kovarian sampel kedua variabel.
2. Nilai  $r$  ( $R$ ) terletak antara batas -1 dan +1, yaitu  $-1 \leq r(R) \leq 1$ .
3. Sifat dasarnya simetris, yaitu koefisien korelasi antara  $X$  dan  $Y$  ( $r_{XY}$  atau  $R_{XY}$ ) sama dengan koefisien korelasi antara  $Y$  dan  $X$  ( $r_{YX}$   $R_{YX}$ ).
4. Tidak tergantung pada titik asal dan skala.
5. Kalau  $X$  dan  $Y$  bebas secara statistik, maka koefisien korelasi antara mereka adalah nol, tetapi kalau  $r(R) = 0$ , ini tidak berarti bahwa kedua variabel adalah bebas (tidak ada hubungan).
6. Nilai  $r(R)$  hanyalah suatu ukuran hubungan linier atau ketergantungan linier saja;  $r(R)$  tadi tidak mempunyai arti untuk menggambarkan hubungan non-linier.
7. Meskipun nilai  $r(R)$  adalah ukuran linier antara dua variabel, tetapi tidak perlu berarti adanya hubungan sebab akibat (*causal*).

### 2.6.13 Membandingkan dua nilai koefisien determinasi

Koefisien korelasi,  $r$  untuk regresi sederhana dan  $R$  untuk regresi berganda mempunyai hubungan yang sangat erat dengan  $r^2$  ( $R^2$ ), walaupun secara konseptual berbeda. Koefisien korelasi mengukur hubungan antara variabel tak bebas ( $Y$ ) dengan variabel bebas ( $X$ ). Formulasi dari  $r$  ( $R$ ) adalah sebagai berikut:

Satu konsep penting lagi berkaitan dengan koefisien determinasi adalah  $R^2$  yang disesuaikan ( $\text{adjusted } R^2 = \bar{R}^2$ ). Nilai ini sangat bermanfaat, terutama ketika hendak membandingkan dua nilai  $R^2$  dari suatu model regresi yang mempunyai variabel tak bebas yang sama, akan tetapi berbeda dalam variabel bebasnya [lebih lanjut mengenai pemilihan model akan diuraikan pada bagian 2.13 di bawah].

Sebagaimana dinyatakan dalam persamaan (2.46) atau (2.49),  $R^2 = 1 - (\text{RSS}/\text{TSS})$ , maka selanjutnya dapat dihitung nilai  $\bar{R}^2$  dengan menggunakan formulasi berikut ini:

$$\begin{aligned}\bar{R}^2 &= 1 - \frac{\text{RSS}/(n-k)}{\text{TSS}/(n-1)} \\ &= 1 - \frac{\text{RSS}/(n-1)}{\text{TSS}/(n-k)}\end{aligned}\tag{2.53}$$

Dengan memasukkan persamaan (2.46) atau (2.49) ke dalam persamaan (2.53), diperoleh:

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{(n-k)}{(n-1)}\tag{2.54}$$

Gambaran besaran nilai  $\bar{R}^2$  adalah sebagai berikut:

1. Jika  $k$  (jumlah parameter) lebih besar dari satu ( $k > 1$ ), maka  $R^2 \leq \bar{R}^2$  bahwa adanya peningkatan atau kenaikan jumlah variabel penjelas dalam suatu model,  $\bar{R}^2$  akan meningkat kurang dari  $R^2$  (nilai  $R^2$  yang tidak disesuaikan). Hal ini terjadi, karena dalam  $\bar{R}^2$  berkaitan dengan derajat kebebasan akibat penambahan variabel penjelas baru dalam model, sementara  $R^2$  tidak memperhitungkan hal tersebut.
2. Walaupun nilai  $R^2$  selalu positif, dalam nilai  $\bar{R}^2$  dapat saja negatif.

## **BAB 3**

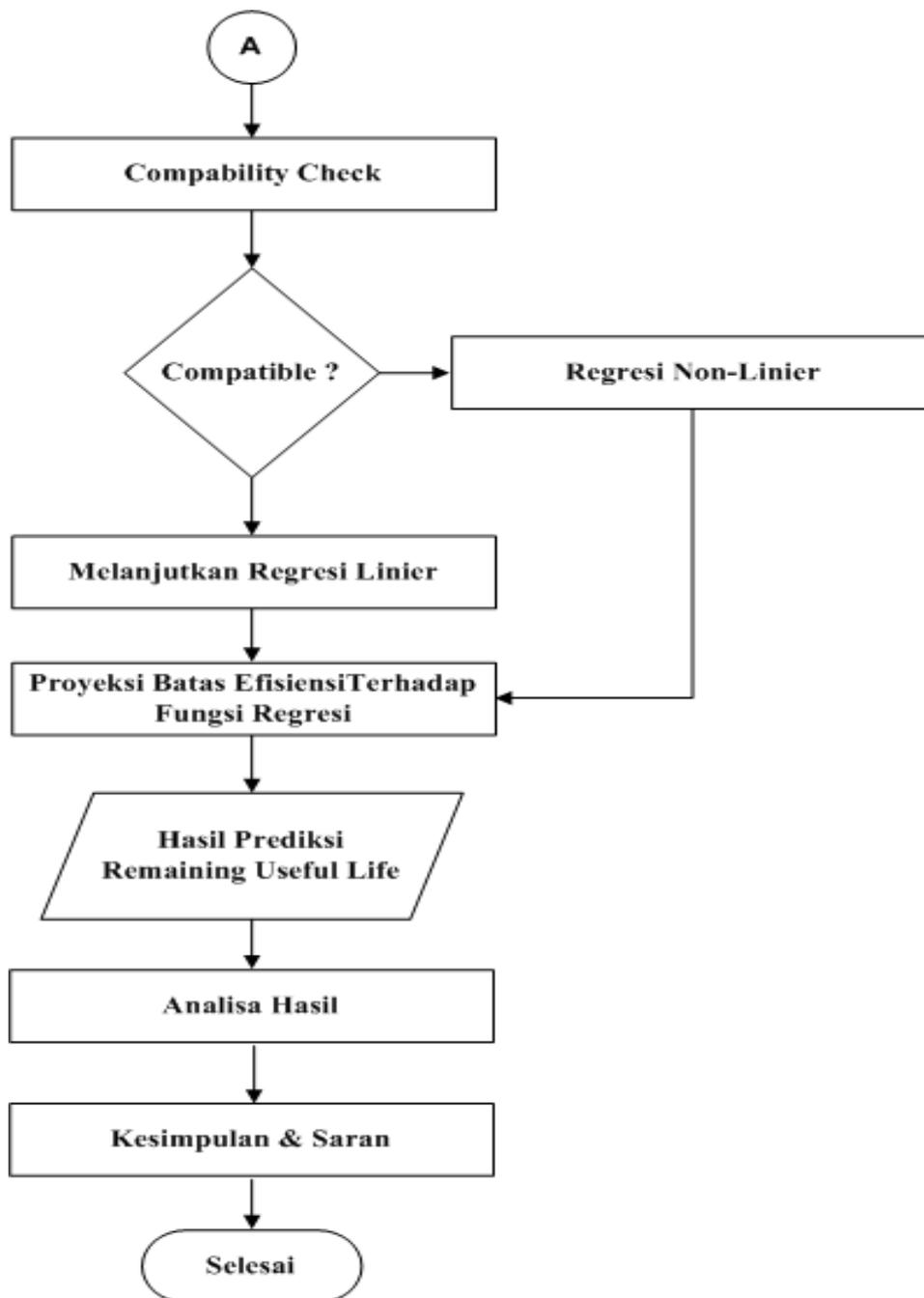
### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Diagram alir penelitian**

Tahapan penelitian yang dilakukan pada pelaksanaan tesis ini mengikuti diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1a dan 3.1b berikut:



Gambar 3.1a Diagram alir penelitian



Gambar 3.1b Diagram alir penelitian (lanjutan)

### 3.2 Identifikasi masalah

Identifikasi masalah dilakukan untuk memperoleh data hasil pengambilan parameter operasi turbin gas yang telah dilakukan sebelumnya dan juga beberapa hasil penelitian terdahulu sebagai referensi untuk pengembangan penelitian ini.

Dari tiga unit turbin gas PLTGU Blok 1, GTG1.1 dipilih menjadi obyek dalam penelitian ini dengan pertimbangan bahwa berdasarkan jadwal inspeksi tahunan, GTG1.1 akan mengalami Major Inspection terlebih dahulu dibandingkan dua GTG lainnya (Tabel 3.1)

Tabel 3.1 Perbandingan jadwal MI terakhir

Unit	Major Inspection Terakhir	Major Inspection Selanjutnya
GTG1.1	Desember 2014	48.000 EOH
GTG1.2	Nopember 2015	
GTG1.3	Agustus 2016	

### 3.3 Perumusan masalah dan tujuan penelitian

Rumusan masalah ditetapkan berdasarkan identifikasi masalah dan studi literatur yang telah dilakukan. Tujuan penelitian yang ditetapkan harus dapat menjawab masalah yang telah dirumuskan sebelumnya.

### 3.4 Pengumpulan data

Data yang dikumpulkan berdasarkan historikal parameter operasi turbin gas mulai dari dua Major Inspection sebelumnya hingga terkini. Data penelitian diambil dari Laporan Harian Produksi, Laporan Bulanan Performance Test, dan Laporan Jam Operasi PLTGU Blok 1 periode 2009 sampai dengan 2017.

Parameter dari data yang diambil sebagai input dalam perhitungan efisiensi kompresor siklus Brayton meliputi: Temperatur Udara Ambient ( $T_1$ ), Tekanan Udara Ambient ( $P_1$ ), Temperatur Udara Tekan ( $T_2$ ), dan Tekanan Udara Tekan gauge ( $P_{2g}$ ). Data output yang diperoleh dari proses perhitungan meliputi: Tekanan Udara Tekan absolute ( $P_2$ ), Temperatur Udara Tekan Ideal ( $T_{2s}$ ), Kerja Kompresor Ideal ( $W_{cs}$ ), Kerja Kompresor Aktual ( $W_c$ ), dan Efisiensi Kompresor ( $\eta_c$ ).

#### 3.4.1 Data inspeksi sebelumnya

Data inspeksi sebelumnya diambil dari dua Major Inspection terakhir GTG1.1, yaitu MI 3 yang dilaksanakan pada 5 Nopember – 9 Desember 2009 dan MI 4 yang dilaksanakan pada 8 Desember 2014 – 21 Pebruari 2015. Data MI 4

(inspeksi terakhir) selanjutnya diolah secara regresi untuk menentukan jadwal Major Inspection selanjutnya (Tabel 3.2)

Tabel 3.2 Histori MI GTG1.1

2009	2010	2011	2012	2013
Major Inspection 3	Combustion Inspection 10	Combustion Inspection 1	Combustion Inspection 1	Combustion Inspection 13
5 Nop - 9 Des	10-Jul	22 - 30 Mar	28 Jul - 14 Agt	8 - 19 Jul
	Hot Gas Path Inspection 3			
132472		6 - 31 Des		
2014	2015	2016	2017	2018
Major Inspection 4		Combustion Inspection 1	No Inspection	Combustion Inspection 15
8 Des'14 - 21 Peb'15		26 Peb - 11 Mar		17 Sep - 17 Okt
160909				

### 3.4.2 Data input

Data input yang digunakan dalam penelitian ini meliputi Temperatur Udara Ambient ( $T_1$ ), Tekanan Udara Ambient ( $P_1$ ), Temperatur Udara Tekan ( $T_2$ ), dan Tekanan Udara Tekan gauge ( $P_{2g}$ ). Parameter-parameter yang diperoleh dengan Tabel 3.3 sebagai berikut:

Tabel 3.3 Data input

Parameter	Satuan	Tahun n								
		Bulan ke 1			Bulan ke 2			Bulan ke n		
		Hari ke 1	Hari ke 2	Hari ke n	Hari ke 1	Hari ke 2	Hari ke n	Hari ke 1	Hari ke 2	Hari ke n
Temperatur Udara Ambient ( $T_1$ )	degC									
Tekanan Udara Ambient ( $P_1$ )	kPa									
Tekanan Udara Tekan gauge ( $P_{2g}$ )	Psi									
Temperatur Udara Tekan ( $T_2$ )	degC									

### 3.4.3 Data output

Data output yang diperoleh dari hasil perhitungan meliputi Tekanan Udara Tekan absolute ( $P_2$ ), Temperatur Udara Tekan Ideal ( $T_{2S}$ ), Kerja Kompresor Ideal ( $W_c$ ), Kerja Kompresor Aktual ( $W_c$ ), dan Efisiensi Kompresor ( $\eta_c$ ). Data tersebut dibuat dengan Tabel 3.4 sebagai berikut:

Tabel 3.4 Data output

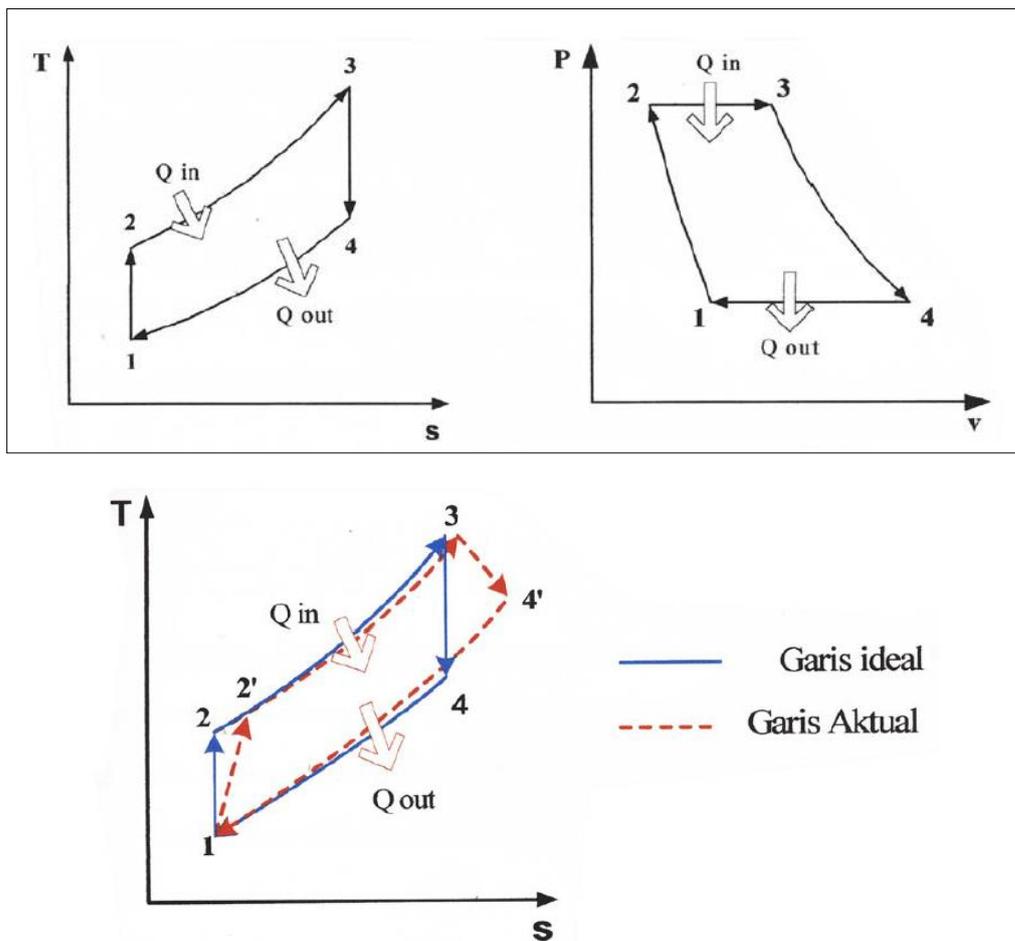
Parameter	Satuan	Tahun n								
		Bulan ke 1			Bulan ke 2			Bulan ke n		
		Hari ke 1	Hari ke 2	Hari ke n	Hari ke 1	Hari ke 2	Hari ke n	Hari ke 1	Hari ke 2	Hari ke n
Temperatur Udara Ambient ( $T_1$ )	K									
Tekanan Udara Ambient ( $P_1$ )	kPa									
Tekanan Udara Tekan gauge ( $P_{2g}$ )	kPa									
Temperatur Udara Tekan ( $T_2$ )	K									
Temperatur Udara Tekan Ideal ( $T_{2i}$ )	K									
Tekanan Udara Tekan (absolut) ( $P_2$ )	kPa									
Kerja Kompresor Ideal ( $W_{ci}$ )	kJ/kg									
Kerja Kompresor Aktual ( $W_c$ )	kJ/kg									
Efisiensi Kompresor ( $\eta_c$ )	%									

### 3.4.4 Variabel penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari variabel prediktor dan variabel respon. Variabel prediktor atau variabel bebas merupakan variabel yang mempengaruhi atau yang menjadi sebab perubahan atau timbulnya variabel respon sedangkan variabel respon atau variabel terikat merupakan variabel yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat adanya variabel prediktor. Dalam penelitian ini, jam operasi turbin gas (dalam satuan EOH) menjadi variabel prediktor sedangkan efisiensi kompresor (dalam satuan %) menjadi variabel respon.

### 3.5 Perhitungan efisiensi kompresor

Turbin gas secara termodinamika bekerja dengan siklus Brayton. Siklus ini merupakan siklus ideal untuk sistem turbin gas siklus terbuka yang terdiri dari dua proses isobar dan dua proses isentropik. Pada kenyataannya, kedua proses tersebut terjadinya penyimpangan sehingga diperoleh proses siklus aktual. Siklus ideal dan siklus aktual tersebut dapat digambarkan pada Gambar 3.2 berikut:



Gambar 3.2 Siklus brayton

Efisiensi kompresor dihitung dengan menggunakan data input meliputi Temperatur Udara Ambient ( $T_1$ ), Tekanan Udara Ambient ( $P_1$ ), Temperatur Udara Tekan ( $T_2$ ), dan Tekanan Udara Tekan gauge ( $P_{2g}$ ). Langkah-langkah perhitungan dilakukan sebagai berikut:

- a. Tekan Udara Tekan absolute ( $P_2$ )

$$P_2 = P_{2\ gauge} + 1\ atm$$

- b. Temperatur Udara Tekan Ideal ( $T_{2s}$ )

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

Dimana  $k = 1,4$

- c. Kerja Kompresor Ideal ( $W_{cs}$ )

$$W_{cs} = h_{2s} - h_1 = c_p \cdot (T_{2s} - T_1)$$

Dimana  $c_p = 1,005\ kJ/(kg.K)$

d. Kerja Kompresor Aktual ( $W_c$ )

$$W_c = h_2 - h_1 = c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

Dimana  $c_p = 1,005 \text{ kJ/(kg.K)}$

e. Efisiensi Kompresor ( $\eta_c$ )

$$\eta_c = \frac{W_{cs}}{W_c}$$

Data hasil perhitungan efisiensi yang diperoleh ditabulasi dengan jam operasi turbin gas dalam Tabel 3.5 berikut:

Tabel 3.5 Data hasil perhitungan efisiensi kompresor terhadap jam operasi

Data Harian GTG1.1 Periode 2009-2014		
No	Jam Operasi	Efisiensi Compressor
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
n		

### 3.6 Regresi linier

Pola degradasi efisiensi kompresor terhadap jumlah jam operasi dihitung dengan regresi linier untuk mendapatkan kurva gambaran kondisi kesehatan turbin gas. Fungsi regresi dari populasi data (PRF) penelitian ini dinyatakan sebagai estimasi fungsi efisiensi kompresor ( $Y$ ) sebagai variabel respon terhadap jam operasi turbin ( $X$ ) sebagai variabel prediktor dengan persamaan sebagai berikut:

$$E(Y | X_i) = \beta_0 + \beta_1 X_i$$

di mana  $E(Y | X_i)$  atau  $E(Y)$  adalah berarti rata-rata atau pengharapan akan nilai efisiensi kompresor ( $Y$ ) pada berbagai tingkat jam operasi turbin gas ( $X_i$ ),  $\beta_0$

dan  $\beta_1$  masing-masing sebagai parameter atau koefisien regresi.  $\beta_0$  adalah koefisien intersep atau konstanta dan  $\beta_1$  adalah koefisien *slope* atau kemiringan. Koefisien slope mengukur tingkat perubahan rata-rata Y per unit akibat perubahan X.

Nilai  $\beta_1$  dihitung dengan persamaan berikut:

$$\beta_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

dimana

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x)^2}{n}$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n}$$

Nilai  $\beta_0$  dihitung dengan persamaan berikut:

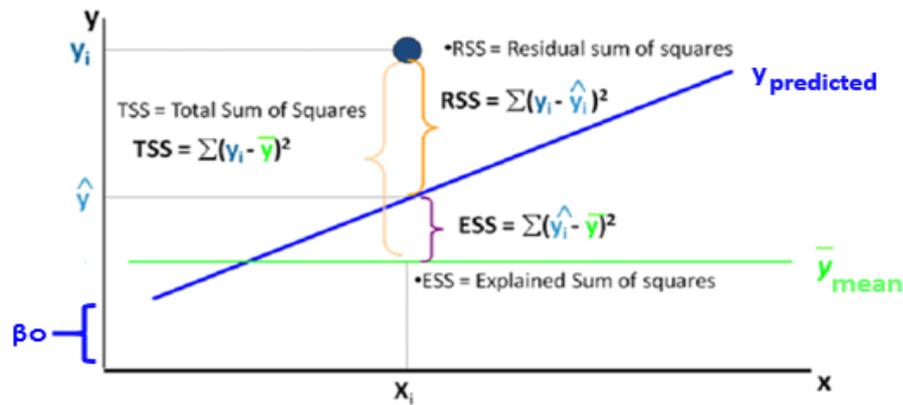
$$\beta_0 = \bar{y}$$

dimana

$$\bar{y} = \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)}{n}$$

### 3.7 Compability check

Hasil regresi linier kemudian diuji dengan compability check untuk mengetahui kesesuaian model regresi yang telah dilakukan. Compability check dilakukan metode Sum Square of Residual (SSR) dari masing-masing fungsi regresi linier dan non-linier untuk mengetahui model regresi yang paling sesuai dengan data sample. Nilai SSR terkecil dari fungsi regresi menunjukkan bahwa fungsi tersebut paling sesuai untuk digunakan (Gambar 3.3).



Gambar 3.3 Sum square of residual

Nilai SSR dihitung dengan rumus berikut:

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2$$

### 3.8 Regresi non-linier

Pada kondisi dimana fungsi regresi linier tidak tepat digunakan pada pola penurunan efisiensi kompresor maka fungsi regresi non-linier kuadratik paling tepat dan umum digunakan untuk memperoleh prediksi prognostik. Persamaan regresi kuadratik yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$E(Y | X_i) = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2$$

di mana  $E(Y | X_i)$  atau  $E(Y)$  adalah berarti rata-rata atau pengharapan akan nilai efisiensi kompresor ( $Y$ ) pada berbagai tingkat jam operasi turbin gas ( $X_i$ ),  $\beta_0$  dan  $\beta_1$  masing-masing sebagai parameter atau koefisien regresi.  $\beta_0$  adalah koefisien intersep atau konstanta dan  $\beta_1$  adalah koefisien *slope* atau kemiringan. Koefisien slope mengukur tingkat perubahan rata-rata  $Y$  per unit akibat perubahan  $X$ .

### 3.9 Proyeksi batas efisiensi terhadap fungsi regresi

Interval major inspection berdasarkan kinerja kompresor ditentukan dengan batas nilai efisiensi kompresor yang masih dapat diterima yang disesuaikan dengan kondisi operasional unit. Berdasarkan dokumen *Electric*

*Power Research Institute (EPRI) 1008325 Tahun 2005 tentang Axial Compressor Performance Maintenance Guide Update*, efisiensi kompresor berada pada kisaran 80% - 90%. Dalam penelitian ini, batas nilai efisiensi kompresor ditentukan dengan variasi 80%, 85%, dan 90% yang kemudian diproyeksikan pada fungsi regresi untuk memperoleh interval *major inspection* tiap nilai batas efisiensi yang telah ditentukan tersebut.

### **3.10 Menentukan prediksi remaining useful life**

Dengan menggunakan batasan nilai efisiensi minimum yang dapat diterima sebesar 90%, diperoleh nilai skenario pesimis prediksi remaining useful life dari selisih interval major inspection ( $t_p$ ) terhadap jam operasi berjalan 8305 EOH. Dengan cara yang sama, diperoleh nilai skenario optimis prediksi remaining useful life dari selisih interval major inspection ( $t_o$ ) terhadap jam operasi berjalan 8305 EOH.

## BAB 4

### PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil pengumpulan data

Data input diperoleh dari hasil pengambilan data history parameter kompresor di Distributed Control System (DCS) Control Room PLTGU Blok 1 UP Muara Karang periode 2009-2017. Tabulasi sebagian data ditunjukkan pada Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1 Hasil pengumpulan data input

Parameter	Satuan	Januari						
		1	2	3	4	5	6	n
Temperatur Udara Ambient (T1)	K	301,4	300,9	301,9	303,91	302,2	300,9	n
Tekanan Udara Ambient (P1)	kPa	101,33	101,33	101,33	101,33	101,33	101,33	n
Tekanan Udara Tekan gauge (P2 <sub>g</sub> )	kPa	987,0193	997,7065	875,665	1009,63	1027,63	1041,145	n
Temperatur Udara Tekan (T2)	K	640,23	633	627	638	638	633	n
Temperatur Udara Tekan Ideal (T2 <sub>s</sub> )	K	593,9076	594,5801	576,827341	602,383	601,75	601,2016	n
Tekanan Udara Tekan (absolut) (P2)	kPa	1088,349	1099,037	976,995	1110,96	1128,96	1142,475	n

#### 4.2 Hasil perhitungan efisiensi kompresor

Data output hasil perhitungan efisiensi kompresor terhadap jam operasi diperlihatkan pada Tabel 4.2.

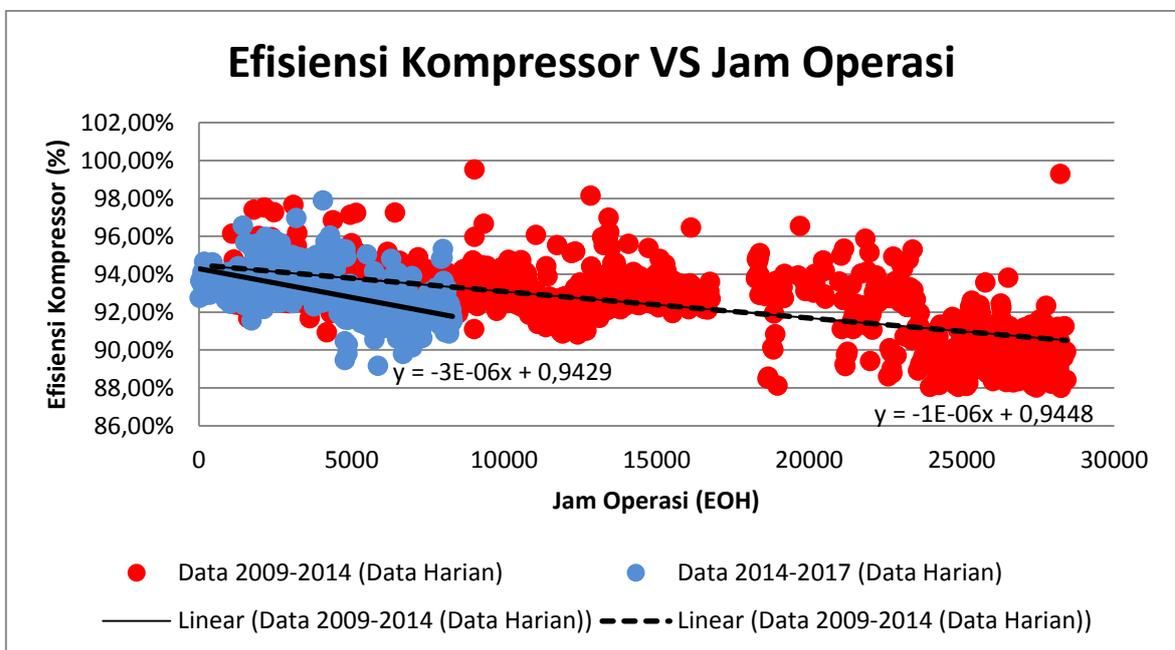
Tabel 4.2: Hasil Perhitungan Efisiensi Kompresor Terhadap Jam Operasi

Data Harian GTG1.1 Periode 2009-2014		
No	Jam Operasi	Efisiensi Compressor
1	0	94,00%
2	422	93,39%
3	1081	93,31%
4	1083	96,14%
5	1138	94,78%
6	1162	94,24%
7	1179	94,08%
8	1192	93,37%
9	1207	92,40%
n	n	n%
1035	28435	88,43%

Data Harian GTG1.1 2014-2017		
No	Jam Operasi	Efisiensi Compressor
1	0	92,44%
2	22	92,75%
3	46	93,64%
4	70	93,76%
5	95	93,48%
6	119	94,11%
7	143	93,83%
8	167	94,65%
9	191	92,88%
n	n	n%
528	8305	91,54%

### 4.3 Hasil regresi linier

Setelah diperoleh data efisiensi kompressor, selanjutnya dilakukan regresi linier (Gambar 4.1) dimana data efisiensi kompressor tersebut menjadi variabel respons/tetap dan jam operasi menjadi variabel prediktor/bebas.



Gambar 4.1 Regresi Linier

Periode 2009-2014 diperoleh fungsi linier  $y = -1E-06x + 0,9448$  dengan data analisis Minitab sebagai berikut:

The regression equation is  
Efisiensi Kompresor = 0,945 - 0,000001 Jam Operasi

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,944787	0,000808	1169,48	0,000
Jam Operasi	-0,00000140	0,00000005	-27,17	0,000

S = 0,0133979 R-Sq = 41,7% R-Sq(adj) = 41,6%

#### Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0,13249	0,13249	738,12	0,000
Residual Error	1033	0,18543	0,00018		
Total	1034	0,31792			

#### Unusual Observations

Obs	Jam Operasi	Efisiensi Kompresor	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
34	1789	0,974087	0,942290	0,000731	0,031797	2,38R
52	2137	0,975214	0,941804	0,000716	0,033410	2,50R
70	2457	0,972778	0,941357	0,000703	0,031421	2,35R
98	3088	0,976513	0,940476	0,000677	0,036036	2,69R
146	4191	0,909366	0,938937	0,000633	-0,029570	-2,21R
155	4387	0,968549	0,938663	0,000626	0,029886	2,23R
183	4955	0,971365	0,937870	0,000604	0,033495	2,50R
195	5150	0,972332	0,937598	0,000597	0,034735	2,60R
252	6423	0,972613	0,935821	0,000552	0,036792	2,75R
362	9023	0,995215	0,932191	0,000475	0,063024	4,71R
363	9030	0,959676	0,932181	0,000475	0,027495	2,05R
379	9335	0,966560	0,931755	0,000468	0,034805	2,60R
454	11044	0,960698	0,929369	0,000435	0,031328	2,34R
487	11734	0,955260	0,928406	0,000426	0,026854	2,01R
541	12836	0,981386	0,926868	0,000418	0,054518	4,07R
561	13219	0,959625	0,926333	0,000417	0,033292	2,49R
563	13263	0,955357	0,926271	0,000417	0,029086	2,17R
569	13404	0,958043	0,926075	0,000416	0,031969	2,39R
571	13423	0,969903	0,926048	0,000416	0,043855	3,27R
573	13446	0,962250	0,926016	0,000416	0,036234	2,71R
577	13514	0,954101	0,925921	0,000416	0,028179	2,10R
605	14083	0,956039	0,925127	0,000418	0,030913	2,31R
636	14730	0,953790	0,924223	0,000421	0,029566	2,21R
696	16122	0,964686	0,922280	0,000438	0,042406	3,17R
726	18284	0,947763	0,919262	0,000484	0,028502	2,13R
727	18307	0,948956	0,919230	0,000485	0,029726	2,22R
729	18328	0,946954	0,919200	0,000485	0,027754	2,07R
731	18346	0,948853	0,919175	0,000486	0,029678	2,22R
735	18381	0,951183	0,919126	0,000487	0,032056	2,39R
739	18636	0,884941	0,918770	0,000494	-0,033829	-2,53R
740	18660	0,885865	0,918737	0,000494	-0,032872	-2,46R
751	18958	0,881191	0,918321	0,000503	-0,037130	-2,77R
762	19703	0,965425	0,917281	0,000525	0,048144	3,60R
771	20462	0,947278	0,916221	0,000550	0,031057	2,32R
776	21045	0,949751	0,915407	0,000570	0,034343	2,57R
779	21141	0,953539	0,915273	0,000573	0,038266	2,86R
803	21836	0,958735	0,914303	0,000598	0,044432	3,32R
804	21920	0,941582	0,914186	0,000602	0,027397	2,05R
805	21973	0,951430	0,914112	0,000604	0,037318	2,79R
819	22591	0,886085	0,913249	0,000627	-0,027165	-2,03R

825	22762	0,949324	0,913010	0,000633	0,036314	2,71R
831	23008	0,945447	0,912667	0,000643	0,032781	2,45R
833	23079	0,942893	0,912568	0,000646	0,030325	2,27R
839	23269	0,947757	0,912303	0,000653	0,035455	2,65R
844	23389	0,953004	0,912135	0,000658	0,040869	3,05R
859	23958	0,880527	0,911341	0,000681	-0,030813	-2,30R
870	24262	0,881571	0,910916	0,000693	-0,029345	-2,19R
877	24604	0,883550	0,910439	0,000708	-0,026888	-2,01R
884	24781	0,881676	0,910192	0,000715	-0,028515	-2,13R
889	24894	0,880512	0,910034	0,000720	-0,029522	-2,21R
899	25158	0,881029	0,909665	0,000731	-0,028636	-2,14R
902	25211	0,882334	0,909591	0,000733	-0,027257	-2,04R
924	25775	0,935691	0,908804	0,000757	0,026887	2,01R
954	26519	0,938174	0,907765	0,000789	0,030409	2,27R
1028	28234	0,992954	0,905371	0,000865	0,087582	6,55R

Periode 2014-2017 diperoleh fungsi linier  $y = -3E-06x + 0,9429$  dengan

data analisis Minitab sebagai berikut:

The regression equation is

Efisiensi Kompresor = 0,943 - 0,000003 Jam Operasi

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,942767	0,000912	1033,37	0,000
Jam Operasi	-0,00000300	0,00000018	-16,52	0,000

S = 0,00961369 R-Sq = 34,2% R-Sq(adj) = 34,0%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0,025224	0,025224	272,92	0,000
Residual Error	526	0,048615	0,000092		
Total	527	0,073839			

Unusual Observations

Obs	Jam Operasi	Efisiensi Kompresor	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
64	1429	0,965588	0,938477	0,000692	0,027112	2,83R
83	1719	0,915551	0,937606	0,000651	-0,022055	-2,30R
113	2178	0,959664	0,936228	0,000589	0,023435	2,44R
119	2310	0,958292	0,935832	0,000573	0,022460	2,34R
121	2347	0,956781	0,935721	0,000568	0,021060	2,19R
128	2462	0,958334	0,935376	0,000554	0,022958	2,39R
141	2683	0,956395	0,934712	0,000529	0,021683	2,26R
172	3181	0,969592	0,933218	0,000479	0,036374	3,79R
225	4057	0,978864	0,930588	0,000425	0,048276	5,03R
226	4080	0,952102	0,930519	0,000424	0,021583	2,25R
230	4145	0,957152	0,930324	0,000422	0,026828	2,79R
239	4268	0,951717	0,929954	0,000420	0,021763	2,27R
240	4292	0,960357	0,929882	0,000420	0,030475	3,17R
260	4558	0,952744	0,929084	0,000419	0,023660	2,46R
264	4595	0,953869	0,928973	0,000419	0,024896	2,59R
279	4775	0,904595	0,928433	0,000422	-0,023838	-2,48R
280	4777	0,894567	0,928427	0,000422	-0,033860	-3,53R
283	4795	0,953187	0,928372	0,000423	0,024815	2,58R
287	4829	0,949095	0,928270	0,000424	0,020824	2,17R
290	4859	0,897968	0,928180	0,000425	-0,030212	-3,15R

291	4869	0,902984	0,928150	0,000425	-0,025166	-2,62R
322	5503	0,950477	0,926247	0,000459	0,024230	2,52R
341	5745	0,905397	0,925521	0,000479	-0,020124	-2,10R
352	5866	0,891697	0,925157	0,000490	-0,033460	-3,48R
389	6297	0,948025	0,923864	0,000535	0,024162	2,52R
420	6690	0,897896	0,922684	0,000582	-0,024787	-2,58R
444	6990	0,901361	0,921783	0,000621	-0,020422	-2,13R
497	7927	0,948020	0,918971	0,000756	0,029049	3,03R
501	7978	0,948570	0,918817	0,000764	0,029752	3,10R
502	7992	0,953230	0,918775	0,000766	0,034454	3,60R

#### 4.4 Hasil compability check

Compability check dilakukan terhadap data periode 2009-2014 dan 2014-2017 dengan hasil sebagai berikut:

##### 4.4.1 Hasil compability check periode 2009-2014

Dari hasil perhitungan total jumlah kuadrat residual untuk masing-masing fungsi regresi linier dan fungsi kuadratik diperoleh hasil pada Tabel 4.3 berikut:

Tabel 4.3 Compability check periode 2009-2014

Perbandingan SSR Regresi 2009-2014	
Regresi	Sum Square of Residual
Linier	0,226
Polynomial (order 2)	0,165

Dengan nilai SSR fungsi kuadratik lebih kecil dibandingkan fungsi linier maka data periode 2009-2014 paling sesuai menggunakan regresi kuadratik.

##### 4.4.2 Hasil compability check periode 2014-2017

Dari hasil perhitungan total jumlah kuadrat residual untuk masing-masing fungsi regresi linier dan fungsi kuadratik diperoleh hasil pada Tabel 4.4 berikut:

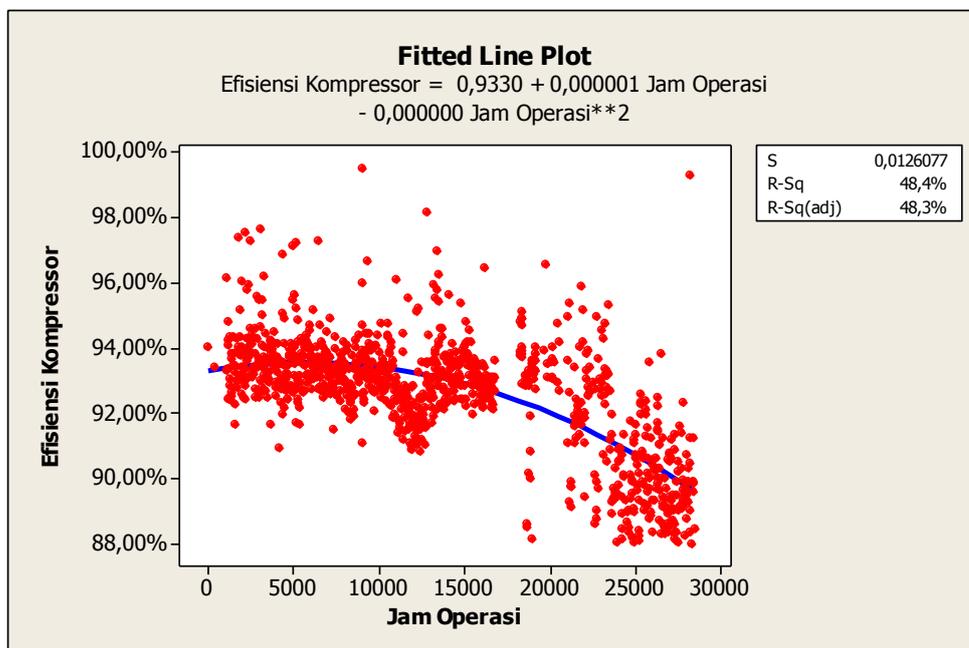
Tabel 4.4 Compability check periode 2014-2017

Perbandingan SSR Regresi 2014-2017	
Regresi	Sum Square of Residual
Linier	0,049
Polynomial (order 2)	0,053

Dengan nilai SSR fungsi linier lebih kecil dibandingkan fungsi kuadratik maka data periode 2014-2017 paling sesuai menggunakan regresi kuadratik.

#### 4.5 Regresi non-linier (kuadratik)

Regresi non-linier (kuadratik) dilakukan dengan data efisiensi kompresor sebagai variabel respons/tetap dan jam operasi menjadi variabel prediktor/bebas. Regresi kuadratik untuk periode data 2009-2014 diperoleh hasil berikut (Gambar 4.2):



Gambar 4.2: Regresi Kuadratik Periode Data 2009-2014

## Polynomial Regression Analysis: Efisiensi Kompresor versus Jam Operasi

The regression equation is  
Efisiensi Kompresor = 0,9330 + 0,000001 Jam Operasi - 0,000000 Jam Operasi\*\*2

S = 0,0126077 R-Sq = 48,4% R-Sq(adj) = 48,3%

Analysis of Variance

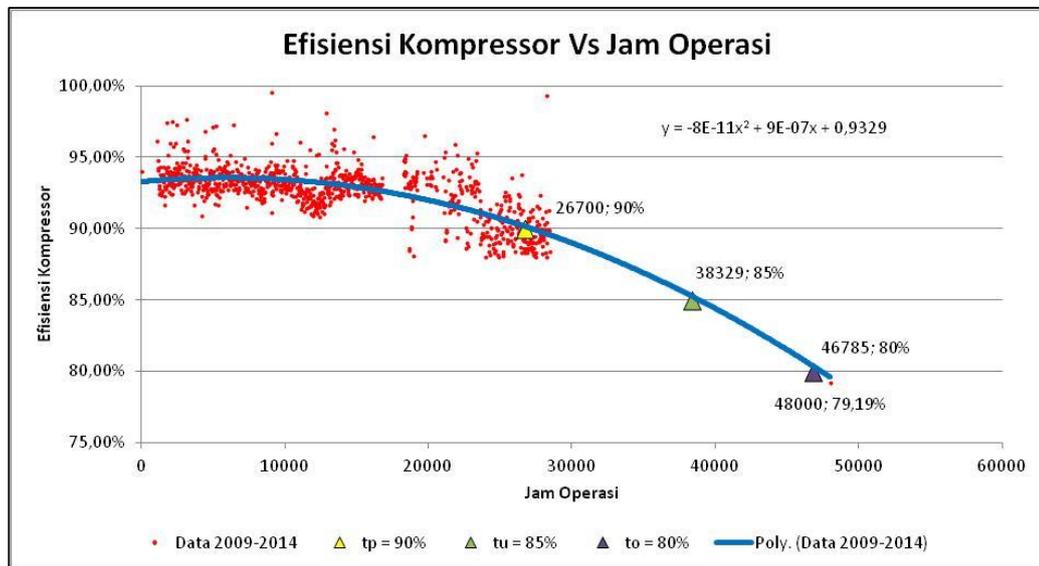
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	0,153882	0,0769412	484,05	0,000
Error	1032	0,164040	0,0001590		
Total	1034	0,317922			

Sequential Analysis of Variance

Source	DF	SS	F	P
Linear	1	0,132495	738,12	0,000
Quadratic	1	0,021387	134,55	0,000

### 4.6 Analisa prediksi *remaining useful life*

Dengan melakukan proyeksi standard interval Major Inspection 48.000 jam operasi terhadap regresi kuadratik periode data 2009-2014 nilai efisiensi kompresor akan mencapai 79,19% (Gambar 4.3):



Gambar 4.3 Proyeksi standard Major Inspection 48.000 EOH

Selanjutnya dengan melakukan proyeksi skenario efisiensi kompresor pada 80%, 85%, dan 90% terhadap fungsi regresi kuadratik diperoleh nilai

interval Major Inspection untuk masing-masing skenario sebagai berikut (Tabel 4.5 dan Tabel 4.6):

Tabel 4.5 Proyeksi batas efisiensi untuk interval *major inspection*

Skenario Interval Major Inspection (Regresi Kuadratik)		
$\eta_c = 90\%$	$\eta_c = 85\%$	$\eta_c = 80\%$
26700	38329	46785

GTG1.1 yang telah beroperasi selama 8305 jam operasi, prediksi *remaining useful life* dengan skenario pesimis ( $\eta_c = 90\%$ ) adalah 18.395 jam operasi sedangkan pada skenario optimis ( $\eta_c = 80\%$ ) adalah 38.480 jam operasi.

Tabel 4.6 Skenario remaining useful life

Remaining Useful Life pada 8305 jam operasi	
Skenario Pesimis ( $t_p - 8305$ )	Skenario Optimis ( $t_o - 8305$ )
18395	38480

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Hasil penelitian dengan metode regresi yang dilakukan pada parameter respon efisiensi kompresor terhadap parameter prediktor jam operasi turbin gas GTG1.1 PT PJB UP Muara Karang (GE MS9001E) dapat dijelaskan sebagai berikut:

- a. Pola degradasi efisiensi kompresor berdasarkan jumlah jam operasi untuk periode 2009-2014 bersifat non-linier kuadratik sedangkan untuk periode 2014-2017 bersifat linier
- b. *Remaining useful life* turbin gas berdasarkan pola degradasi efisiensi kompresor pada kondisi jam operasi sebelum Major Inspection adalah sebagai berikut: Pada kondisi 8.305 jam operasi, skenario optimis diperoleh 18.395 jam operasi dan skenario pesimis diperoleh 38.480 jam operasi.

#### **5.2 Saran**

Beberapa saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Agar dilakukan review lingkup dan metode pembersihan blade kompresor pada saat Major Inspection dan memperpendek interval kompresor *waterwash* untuk memperlambat trending penurunan efisiensi kompresor akibat *fouling*.
- b. Metode penentuan interval inspeksi dalam penelitian ini menggunakan regresi linier dan non-linier untuk parameter respon efisiensi kompresor. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan studi penentuan interval inspeksi dengan multirespon yang disesuaikan dengan lingkup pekerjaan Major Inspection lainnya.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- L, Childs, Christopher; Janawitz, Jamison; Masso, James. (2014). *Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations*. Atlanta: GE Power and Water.
- Gujarati, D. (2003). *Basic Econometrics*. Texas: The McGraw-Hill Companies.
- Koutsoyianis, A. (1977). *Theory of Econometrics*. New York: Harper & Row Publishers, Inc.
- L, Blank. (1982). *Statistical Procedures For Engineering, Management, And Science*. Texas: McGraw-Hill International Book Company.
- Levine, P;. (2005, February). Axial Compressor Performance Maintenance Guide Update. *EPRI 1008325* .
- Li, Y., & Nilkitsaranont, P. (2009). Gas Turbine Performance Prognostic for Condition Based-Maintenance. *Applied Energy* , 86 (12), 2152-2161.
- Montgomery, D. (1991). *Design and Analysis of Experiments*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BIODATA PENULIS**

---



Jayadi dilahirkan di Alitta, Pinrang, Sulawesi Selatan pada tanggal 06 bulan Mei tahun 1981. Penulis memulai pendidikan formal di SDN 79 Pinrang, kemudian melanjutkan ke SMPN 1 Mattirobulu Pinrang dan SMUN 1 Parepare. Penulis menyelesaikan program sarjana di Universitas Hasanuddin Makassar tahun 2005, dengan mengambil program studi Teknik Mesin.

Penulis menyelesaikan program magister di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta tahun 2012, dengan mengambil program studi Magister Manajemen. Penulis kemudian melanjutkan program magister di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan bidang keahlian Manajemen Energi melalui program beasiswa kerja sama antara Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dan PT Pembangkitan Jawa Bali (PT. PJB).

Saat ini penulis bekerja di PT Pembangkitan Jawa Bali Unit Pembangkitan Muara Karang, sebuah perusahaan pembangkit listrik yang terletak di Pluit Jakarta Utara, DKI Jakarta. Penulis berharap tulisan ini dapat menambah ilmu dan wawasan serta bermanfaat bagi pengembangan penelitian selanjutnya. Saran dan kritik mengenai tulisan ini dapat dikirimkan melalui email: [jayadi@ptpjb.com](mailto:jayadi@ptpjb.com)