

**PENENTUAN BEBAN OPTIMAL PADA TURBIN GAS
PLTGU DENGAN MENGGUNAKAN
*NONLINEAR PROGRAMMING***

SKRIPSI

**MUHAMAD FIRDAUS
0606077301**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI
DEPOK
JUNI 2010**

**PENENTUAN BEBAN OPTIMAL PADA TURBIN GAS
PLTGU DENGAN MENGGUNAKAN
*NONLINEAR PROGRAMMING***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**MUHAMAD FIRDAUS
0606077301**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

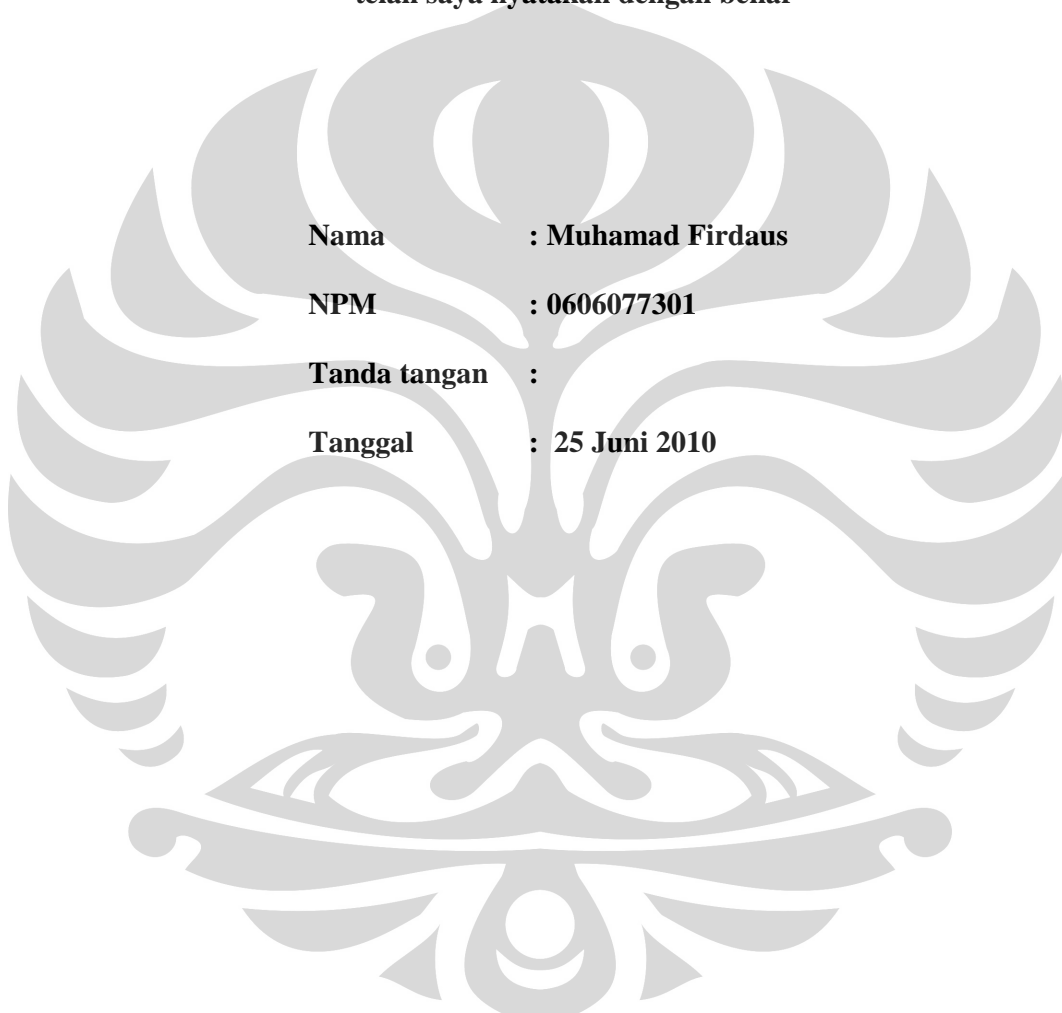
**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar**

Nama : Muhamad Firdaus

NPM : 0606077301

Tanda tangan :

Tanggal : 25 Juni 2010



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Muhamad Firdaus
NPM : 0606077301
Program Studi : Teknik Industri
Judul Skripsi : Penentuan Beban Optimal pada Turbin Gas
PLTGU dengan Menggunakan *Nonlinear
Programming*

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Yadrifil, M. Sc. ()
Penguji : Ir. Rahmat Nurcahyo, M. Eng. Sc ()
Penguji : Ir. Erlinda Muslim, MEE. ()
Penguji : Ir. Sri Bintang Pamungkas, MSISE, Ph.D. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Juni 2010

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas karunia dan kemudahan yang telah diberikan. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka melengkapi salah satu persyaratan untuk menyelesaikan Program Pendidikan Sarjana Teknik Industri, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, saya menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Yadrifil, M. Sc., selaku dosen pembimbing skripsi, atas segala bimbingan, bantuan, arahan, dukungan, serta kesediaannya untuk berbagi pengalaman tentang kemahasiswaan FTUI tahun 70-an
2. Bapak Dr. Ir. T. Yuri M. Zagloel, MEng.Sc, selaku Ketua Departemen Teknik Industri FTUI, yang telah memberikan banyak bimbingan bagi para mahasiswanya.
3. Ibu Ir. Fauzia Dianawati, M.Si., selaku Sekretaris Departemen Teknik Industri FTUI dan Pembimbing Akademik yang selalu memberikan waktu luang untuk berdiskusi dan memberikan solusi.
4. Bapak Ir. Amar Rachman, MEIM, yang telah memberikan banyak sekali ide, saran, dan pengarahan, sehingga skripsi ini akhirnya dapat terwujud.
5. Bapak Akhmad Hidayatno, ST. MBT, Bapak Armand Omar Moeis, S.T., M.Sc, Mas Komarudin, S.T., M.Eng, atas pengarahan dan *knowledge sharing* yang diberikan sehingga dapat membuka wawasan baru bagi penulis, serta seluruh dosen Departemen Teknik Industri yang telah memberikan ilmu-ilmu yang sangat berharga kepada penulis
6. Bu Har, Mbak Triana, Mbak Willy, Mba Fatimah, Mas Dodi, Mas Mursyid, Mas Latief, Mas Iwan dan seluruh karyawan Departemen Teknik Industri atas semua bantuannya kepada penulis.
7. Bapak Ir. Thommi Haposan Situmeang, M.T, selaku manajer Enjiniring PT PTB Unit Muara Tawar yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melakukan penelitian PT PJB Unit Muara Tawar.

8. Mas Emiel selaku mentor saya ketika melakukan penelitian. Terima kasih atas ilmu, pengalaman, dan kesabarannya.
9. Orang tua penulis, kakak, adik, serta keluarga besar yang selalu memberikan motivasi dan dukungan kepada penulis.
10. Fajri Ramdhan Saleh atas bantuan dan kesediannya untuk menjadi *problem solver* serta kesabarannya untuk dijadikan tempat bertanya.
11. Billy, Norman Erikson, Togi Sidabutar, dan Budianto Linus, selaku rekan satu bimbingan yang selalu mengingatkan dan memberikan motivasi untuk menyelesaikan skripsi ini.
12. M. Aldi Witjaksono, Fatkhurrohman, Alvin Kusuma, Faishal Dwi Ismail, Daniel Jandi, Aditya Budhi, Budi Nuranto Kurniawan, Nicholas, Yudianto Setyowidodo, Steven Sulisty, M. Aditia Eka Putra, Adi Putra Pradana, Arya Abbyasa, Okky Kurniawan selaku rekan seperjuangan yang selalu ceria dan memberikan inspirasi.
13. Aziiz Sutrisno, Nuki Suprayitno, Lindi Anggraini, Sisca Pratiwi, dan Christie THL Gaol, yang selalu menemani penulis ketika berdiskusi di laboratorium SEMS.
14. Ismi Mey, Mona Ariesta, Dinar Sukmaningati, Suryaningsih, Tuti Arsyida, yang begitu baik hati dan dapat menjadi penyemangat teman-teman yang lain.
15. Seluruh teman-teman angkatan 2006 Teknik Industri atas kebersamaan dan keceriaan bersama. Kalian adalah harta yang tak ternilai dalam hidup.
16. Seluruh warga Teknik industri angkatan 2007, 2008, dan 2009 atas do'a dan dukungannya
17. Semua pihak yang terlibat dan telah membantu penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Akhirnya, penulis berharap agar skripsi ini bisa memberikan inspirasi dan manfaat bagi semua pihak yang membacanya dan bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 25 Juni 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhamad Firdaus

NPM : 0606077301

Program Studi : Teknik Industri

Departemen : Teknik Industri

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Penentuan Beban Optimal pada Turbin Gas PLTGU dengan Menggunakan
*Nonlinear Programming***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 25 Juni 2010

Yang Menyatakan

(Muhamad Firdaus)

ABSTRAK

Nama : Muhamad Firdaus
Program Studi : Teknik Industri
Judul : Penentuan Beban Optimal pada Turbin Gas PLTGU dengan Menggunakan *Nonlinear Programming*

Penelitian ini dilakukan untuk memperoleh beban optimal pada turbin gas PLTGU guna meminimalkan penggunaan bahan bakar gas. Optimasi ini dilakukan dengan merancang model matematika dengan menggunakan *nonlinear programming* sehingga dapat menentukan beban yang optimal pada masing-masing turbin gas untuk memenuhi perintah produksi. Pendekatan *nonlinear programming* digunakan karena hubungan yang terjadi antar variabel bersifat nonlinear. Hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah menurunnya biaya konsumsi bahan bakar gas. Setelah dilakukan penelitian, diperoleh penghematan biaya bahan bakar gas sebesar Rp 1.693.144.577,- per hari.

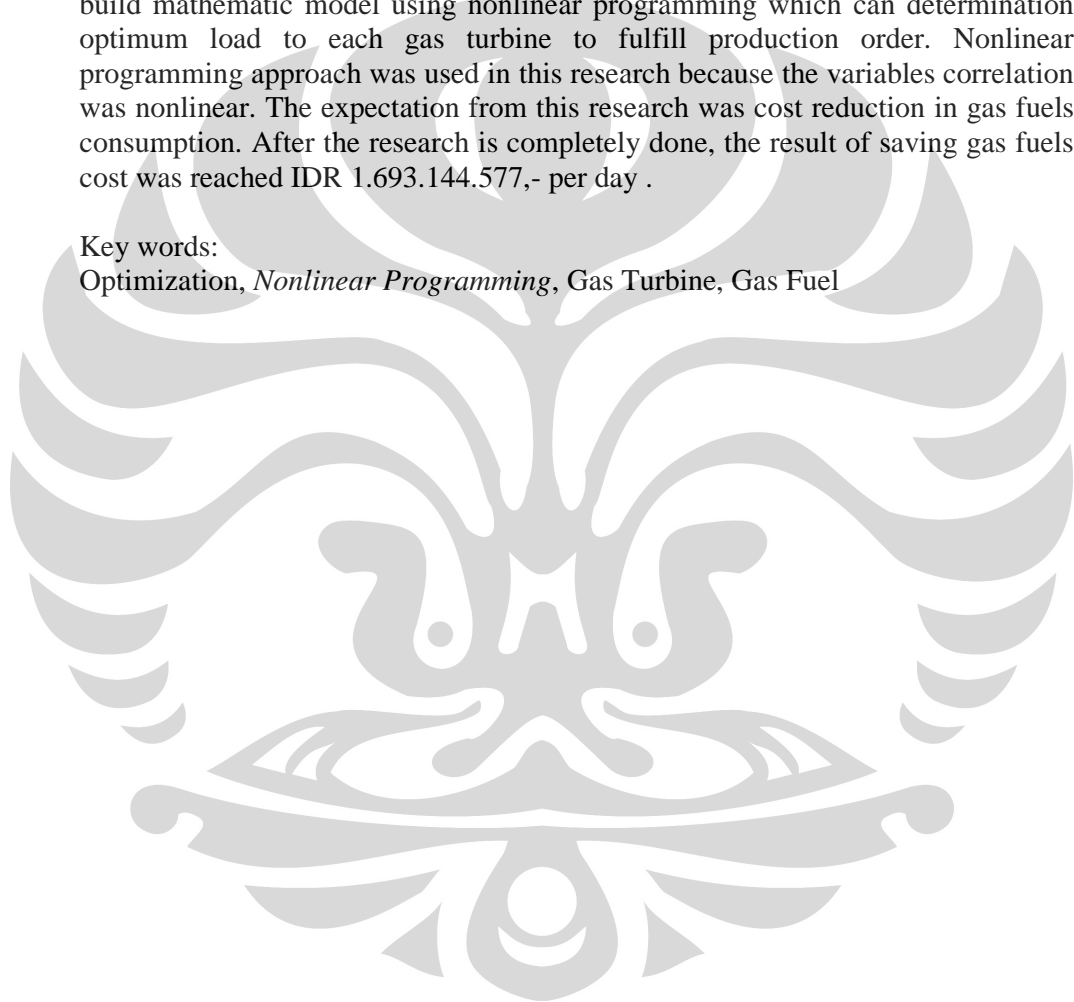
Kata kunci:
Optimasi, *Nonlinear Programming*, Turbin Gas, Bahan Bakar Gas

ABSTRACT

Name : Muhamad Firdaus
Study Program : Industrial Engineering
Title : Optimum Load Determination for Gas Turbine in PLTGU Using
Nonlinear Programming

The aim of this research is to obtain gas turbines optimum load in PLTGU, in order to minimize gas fuels consumption. This optimization was achieved with a built mathematic model using nonlinear programming which can determine optimum load to each gas turbine to fulfill production order. Nonlinear programming approach was used in this research because the variables correlation was nonlinear. The expectation from this research was cost reduction in gas fuels consumption. After the research is completely done, the result of saving gas fuels cost was reached IDR 1.693.144.577,- per day .

Key words:
Optimization, *Nonlinear Programming*, Gas Turbine, Gas Fuel



DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Diagram Keterkaitan Masalah	3
1.3 Rumusan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.6 Metodologi Penelitian	4
1.7 Sistematika Penulisan	7
2. LANDASAN TEORI	9
2.1 <i>Operations Research</i>	9
2.1.1 <i>Sejarah Operations Research</i>	9
2.1.2 <i>Pengaruh Penggunaan Operations Research</i>	11
2.1.3 <i>Model Pendekatan Operations Research</i>	11
2.1.3.1 <i>Defining the Problem and Gathering Data</i>	11
2.1.3.2 <i>Formulating a Mathematical Model</i>	12
2.1.3.3 <i>Deriving Solution from the Model</i>	12
2.1.3.4 <i>Testing the Model</i>	13
2.1.3.5 <i>Preparing Apply the Model</i>	14
2.1.3.6 <i>Implementation</i>	14
2.2 <i>Nonlinear Programming</i>	15
2.2.1 <i>Graphical Illustration of Nonlinear Programming Problems</i>	15
2.2.2 <i>Types of Nonlinear Programming Problems</i>	18
2.2.2.1 <i>Unconstrained Optimization</i>	19
2.2.2.2 <i>Lineary Constrained Optimization</i>	19
2.2.2.3 <i>Quadratic Programming</i>	19
2.2.2.4 <i>Convex Programming</i>	20
2.2.2.5 <i>Separable Programming</i>	20
2.2.2.6 <i>Nonconvex Programming</i>	20
2.2.2.7 <i>Geometric Programming</i>	21
2.2.2.8 <i>Fractional Programming</i>	21
2.3 <i>One-Dimensional Search Procedure</i>	22
3. PENGUMPULAN DATA	23
3.1 Profil Perusahaan PT Pembangkit Jawa Bali	23
3.1.1 Unit Pembangkit PT Pembangkit Jawa Bali	24
3.1.1.1 Unit Pembangkit Gresik	24
3.1.1.2 Unit Pembangkit Muara Karang	25
3.1.1.3 Unit Pembangkit Paiton	26

3.1.1.4	Unit Pembangkit Cirata.....	26
3.1.1.5	Unit Pembangkit Brantas	27
3.1.1.6	Unit Pembangkit Muara Tawar	27
3.2	PLTGU	28
3.2.1	Komponen PLTGU	28
3.2.1.1	Turbin Gas.....	28
3.2.1.2	Turrbin Uap.....	34
3.2.1.3	<i>Heat Recovery Steam Geerator</i>	35
3.2.1.4	Generator.....	36
3.2.2	Proses Produksi Listrik pada PLTGU	37
3.3	Data yang Dibutuhkan	38
3.3.1	Unit Pembangkit.....	39
3.3.2	Data Produksi dan Beban pada Turbin.....	39
3.3.3	Data Penggunaan Bahan Bakar.....	41
3.3.4	Data Biaya Bahan Bakar Gas.....	41
3.3.5	Data Total Produksi Listrik	41
4.	PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA	42
4.1	Pengolahan Data	42
4.1.1	Penyusunan Model Matematika.....	42
4.1.2	Input Data	52
4.2	Hasil Pengolahan Data	54
4.3	Simulasi Beban	55
4.4	Analisa.....	56
4.4.1	Analisis Model Matematika	56
4.4.1.1	Fungsi Tingkat Penggunaan Bahan Bakar dengan Beban pada Turbin Gas	56
4.4.1.2	Fungsi Beban pada Turbin Uap dengan Total Produksi dari Turbin Gas	57
4.4.1.3	Kapasitas Turbin Gas.....	57
4.4.2	Analisa Hasil Pengolahan Data	57
4.4.2.1	Analisa Beban Optimal dan Penggunaan Bahan Bakar.....	57
4.4.2.2	Analisa Sebelum dan Sesudah Optimasi.....	59
4.4.3	Pengaruh Biaya Bahan Bakar Gas Terhadap Konsumsi Biaya Bahan Bakar.....	60
4.4.4	Analisa Simulasi Beban	60
5.	KESIMPULAN.....	62
	DAFTAR REFERENSI	63

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Daftar Unit Pembangkit	39
Tabel 3.2. Data Produksi dan Beban pada Turbin	39
Tabel 3.3. Data Penggunaan Bahan Bakar Gas pada Turbin Gas 1	41
Tabel 4.1. Penggunaan Bahan Bakar Gas pada Turbin Gas 1	43
Tabel 4.2.. Penggunaan Bahan Bakar Gas pada Turbin Gas 2	43
Tabel 4.3.. Penggunaan Bahan Bakar Gas pada Turbin Gas 3	44
Tabel 4.4. Beban pada Turbin Gas dan Uap	49
Tabel 4.5. Input Perintah Produksi	53
Tabel 4.6. Output Perhitungan untuk Beban pada Turbin Gas dan Turbin Uap, Total Produksi, serta Tingkat Penggunaan Bahan Bakar	53
Tabel 4.7. Contoh Hasil Pengolahan Data untuk 20 Perintah Produksi	54
Tabel 4.8. Penggunaan Bahan Bakar Gas Sebelum dan Sesudah Optimasi selama 24 jam	55
Tabel 4.9. Skenario Simulasi Beban pada Turbin Gas	55
Tabel 4.10. Rata-rata Penggunaan Bahan Bakar Gas pada Simulasi Beban	56
Tabel 4.11. Output Perhitungan untuk Beban pada Turbin Gas dan Turbin Uap, Total Produksi, serta Tingkat Penggunaan Bahan Bakar	58
Tabel 4.12. Selisih Penggunaan Bahan Bakar Gas Sebelum dan Sesudah Optimasi Selama 24 jam	59
Tabel 4.13. Pengaruh Perubahan Biaya Bahan Bakar Gas	60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Diagram Keterkaitan Masalah	3
Gambar 1.2.	Diagram Alir Metodologi Penelitian.....	6
Gambar 2.1.	Contoh Grafik dengan Fungsi Kendala Nonlinear.....	16
Gambar 2.2.	Contoh Grafik dengan Fungsi Tujuan Nonlinear	17
Gambar 2.3.	Contoh Grafik dengan Fungsi Kendala Nonlinear.....	18
Gambar 2.4.	Contoh Grafik <i>Concave Function</i> dan <i>Convex Function</i>	18
Gambar 2.5.	<i>Quadratic Programming</i>	19
Gambar 3.1.	Struktur Organisasi PT Pembangkit Jawa Bali.....	24
Gambar 3.2.	Persebaran unit pembangkit PT PJB	28
Gambar 3.3.	Turbin gas	34
Gambar 3.4.	Turbin Uap.....	35
Gambar 3.5.	<i>Heat Recovery Steam Generator</i>	36
Gambar 3.6.	<i>Generator</i>	37
Gambar 3.7.	Skema PLTGU PT PJB unit Muara Tawar	38
Gambar 4.1.	Hasil Regresi pada Turbin Gas 1	46
Gambar 4.2.	Hasil Regresi pada Turbin Gas 2	46
Gambar 4.3.	Hasil Regresi pada Turbin Gas 3	47
Gambar 4.4.	Hasil Regresi pada Turbin Uap.....	50
Gambar 4.5.	Skema Pengolahan Data	52

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Sampel Data Produksi dan Beban pada <i>Combine Cycle</i> Maret 2010	64
Lampiran 2 Hasil Perhitungan Sebelum dan Sesudah Optimasi Selama 24 jam...	74
Lampiran 3 Produksi Unit Muara Tawar Tahun 2009	79



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Listrik merupakan salah satu sumber energi utama untuk melakukan berbagai macam aktifitas manusia. Penggunaannya yang semakin luas menjadikan sumber energi ini sebagai salah satu kebutuhan dasar manusia. Dua aktifitas utama yang sangat bergantung pada energi listrik adalah aktifitas rumah tangga dan industri. Bahkan kebutuhan energi ini harus dipenuhi selama 24 jam untuk menunjang keberlangsungan aktifitas yang ada.

Direktur Utama PT PLN menyebutkan bahwa pada tanggal 5 Juni 2010 konsumsi listrik untuk kawasan Jawa Bali mencapai rekor tertinggi, yaitu 19.896 Mega Watt. Bahkan untuk tahun 2010 setiap bulannya terjadi penambahan listrik sebesar 100 Mega Watt. Selain itu menurut Badan Pusat Statistik, pada tahun 1995-2007 distribusi listrik kepada industri dan rumah tangga selalu mengalami kenaikan setiap tahunnya. Pada tahun 2007 distribusi listrik untuk industri mencapai 45.802.511 Mega Watt dan untuk rumah tangga mencapai 47.324.905 Mega Watt.¹

Kebutuhan listrik tersebut dipenuhi oleh berbagai macam pembangkit listrik yang ada di Indonesia. Untuk wilayah Jawa Bali saja misalnya, kebutuhan listrik dipenuhi oleh Indonesia Power dan Pembangkit Jawa Bali. Pembangkit yang beroperasi, diantaranya PLTA, PLTP, PLTU, PLTG, dan PLTGU. Pembangkit yang menggunakan energi terbarukan sebagai sumber penggerak turbinnya hanya PLTA dan PLTP (panas bumi).

Berdasarkan kondisi di atas, pembangkit listrik yang menggunakan sumber energi tidak terbarukan untuk menggerakkan turbin jelas harus meningkatkan efisiensinya karena tingginya tingkat produksi. Energi yang tidak terbarukan pada suatu saat akan habis cadangannya sehingga efisiensi harus ditingkatkan agar dapat menekan biaya konsumsi bahan bakar.

Salah satu jenis pembangkit yang menggunakan energi tidak terbarukan adalah PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap). PLTGU merupakan salah

¹ www.bps.go.id

satu jenis pembangkit listrik yang menggabungkan PLTG dan PLTU dengan sumber energi utama berupa gas.

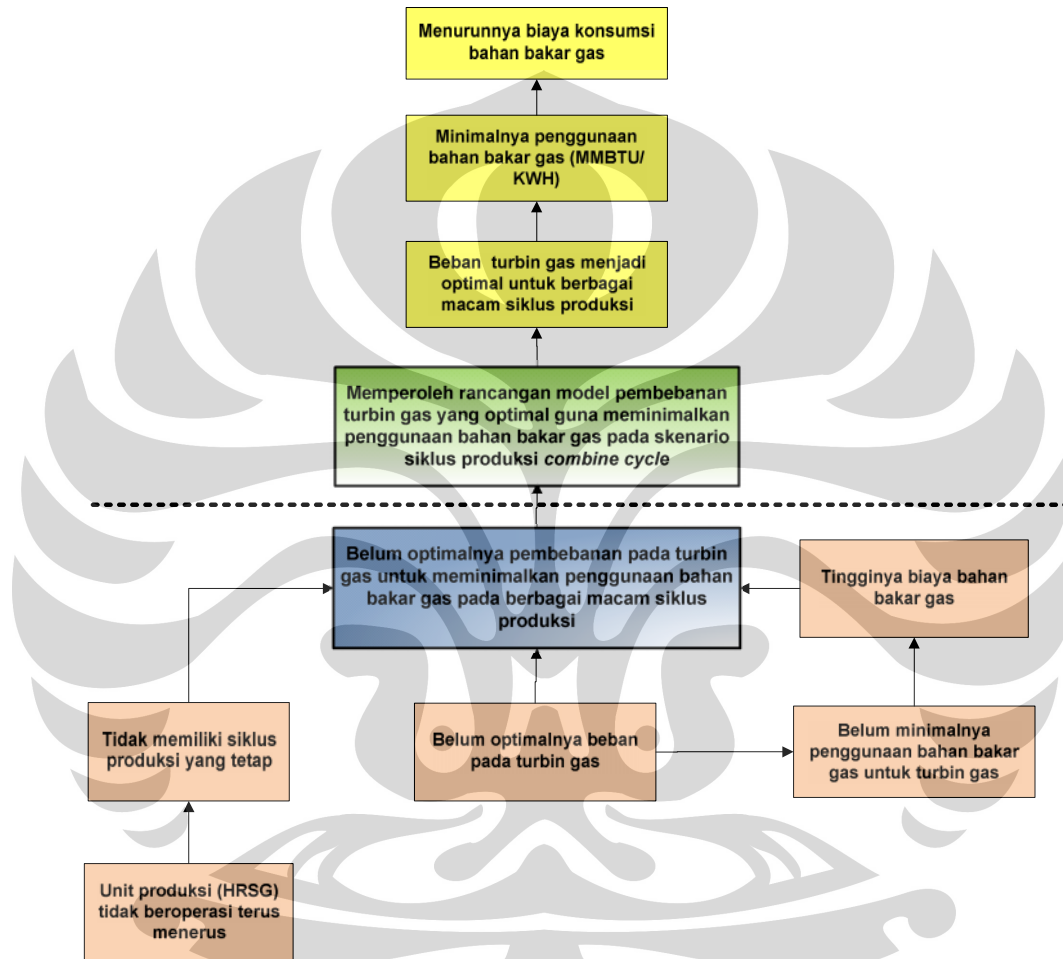
PLTGU dengan sumber energi gas harus dapat meminimalkan penggunaan bahan bakar gas tanpa mengurangi perintah produksi. Tingkat penggunaan bahan bakar gas dipengaruhi oleh beberapa faktor dan salah satu yang tergolong signifikan adalah beban yang diberikan kepada turbin gas yang terinstalasi. Beban yang diberikan kepada turbin gas secara paralel atau bersamaan mempengaruhi konsumsi energi pembakaran. Selain itu siklus produksi yang tidak tetap pada PLTGU juga mempengaruhi beban pada turbin gas sehingga berpengaruh juga terhadap penggunaan energi yang dibutuhkan. Siklus produksi yang dapat terjadi pada PLTGU adalah *combine cycle*, *open cycle*, dan gabungan keduanya. Pada *combine cycle*, uap hasil pembakaran pada turbin gas seluruhnya disalurkan ke turbin uap untuk membangkitkan listrik kembali sedangkan *open cycle* terjadi ketika uap hasil pembakaran pada turbin gas langsung dibuang ke udara sehingga turbin uap tidak membangkitkan listrik. Pada proses gabungan ada sebagian uap hasil pembakaran dari turbin gas yang disalurkan ke turbin uap dan ada yang langsung dilepaskan ke udara.

Masalah muncul ketika penggunaan bahan bakar untuk bahan bakar turbin gas belum mencapai nilai minimal. Kondisi ini tentunya akan mempengaruhi biaya yang dikeluarkan untuk konsumsi bahan bakar. Oleh karena itu, perlu dicari sebuah solusi yang dapat meminimalkan penggunaan bahan bakar dengan mengoptimalkan beban yang diberikan kepada turbin gas.

Salah satu metode optimasi yang digunakan untuk mencari solusi dari masalah ini adalah dengan menggunakan *nonlinear programming*. Pendekatan metode ini hampir sama dengan pendekatan *linear programming* yang memiliki *decision variable*, *objective function*, dan *constraints function*. Namun pada *nonlinear programming* persamaan atau fungsi yang ada sifatnya tidak linear. Dengan metode ini akan diformulasikan sebuah model matematika yang dapat memenuhi perintah produksi dengan mengoptimalkan beban pada turbin gas sehingga dapat meminimalkan penggunaan bahan bakar.

1.2 Diagram Keterkaitan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah di atas, maka dapat dibuat diagram keterkaitan masalah yang menampilkan permasalahan secara visual dan sistematis. Diagram keterkaitan masalah penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 1.1.



Gambar 2.1 Diagram Keterkaitan Masalah

1.3 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dijadikan fokus penelitian adalah menentukan beban optimal pada turbin gas guna meminimalkan penggunaan bahan bakar gas untuk skenario siklus produksi *combine cycle*.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan diagram keterkaitan masalah yang telah dijelaskan sebelumnya, maka tujuan dari penelitian ini adalah memperoleh rancangan model pembebanan turbin gas yang optimal guna meminimalkan penggunaan bahan bakar gas pada skenario siklus produksi *combine cycle*.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan pembatasan masalah agar pelaksanaan serta hasil yang akan diperoleh sesuai dengan tujuan pelaksanaannya. Adapun ruang lingkungannya adalah:

1. Penelitian dilakukan di PT PJB (Pembangkit Jawa Bali) unit Muara Tawar.
2. Penelitian hanya dilakukan pada blok 1 PT PJB unit Muara Tawar, yang terdiri dari 3 unit pembangkit turbin gas, 3 unit HRSG (*Heat Recovery Steam Generation*), dan 1 unit pembangkit turbin uap.
3. Bahan bakar yang digunakan pada proses pembakaran untuk menggerakkan turbin gas adalah gas.
4. Penelitian hanya fokus pada kondisi siklus produksi *combine cycle*
5. Satuan energi yang digunakan untuk menghitung penggunaan bahan bakar gas adalah MMBTU/KWh (*Million British Thermal Unit/KiloWatt hour*)

1.6 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan dalam penelitian ini secara sistematis dijelaskan sebagaimana pada gambar 1.2 dengan uraian sebagai berikut:

1. Perumusan ide-ide topik penelitian dan mengidentifikasi permasalahan
Pada tahap pertama, dilakukan pencarian tema-tema yang menarik untuk diangkat, baik dari pencarian pada situs-situs internet, jurnal, buku, maupun studi kasus di lapangan.
2. Studi literatur dasar teori penelitian
Pada tahap ini dilakukan studi literatur teori-teori yang menjadi dasar dalam penelitian, yaitu *operation research*, *nonlinear programming*.

3. Melakukan perumusan masalah

Berdasarkan identifikasi permasalahan dan studi literatur teori, dapat dirumuskan masalah untuk penelitian ini, yaitu perlu dilakukannya optimasi beban pada turbin gas.

4. Penentuan topik penelitian

Setelah melakukan perumusan masalah, topik penelitian dapat ditentukan, yaitu optimasi beban pada turbin gas dengan menggunakan *nonlinear programming*.

5. Penentuan tujuan penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah memperoleh rancangan model pembebanan turbin gas yang optimal guna meminimalkan penggunaan bahan bakar gas pada skenario siklus produksi *combine cycle*.

6. Dilakukan pengumpulan data primer. Berikut data atau informasi yang dibutuhkan:

- Data sistem produksi *combine cycle*
- Unit turbin gas
- Unit HRSG
- Data historis perintah produksi
- Data historis nilai beban pada tiap turbin gas (MW)
- Data historis nilai beban pada turbin uap (MW)
- Data historis penggunaan bahan bakar (kg/s)
- Data historis efisiensi (MMBTU/KWh)
- Biaya bahan bakar gas (USD/MMBTU)

7. Pembuatan model optimasi beban pada turbin gas

Setelah pemantapan studi terhadap dasar teori dan pengumpulan data, dibuatlah model persamaan matematis dengan menggunakan *nonlinear programming*. Model ini dibuat berdasarkan kondisi *combine cycle*.

8. Pengolahan data

Pada tahap ini, dilakukan pengolahan data berdasarkan model yang telah dibuat sehingga dapat memberikan beban optimal pada turbin gas untuk meminimalkan penggunaan bahan bakar gas.

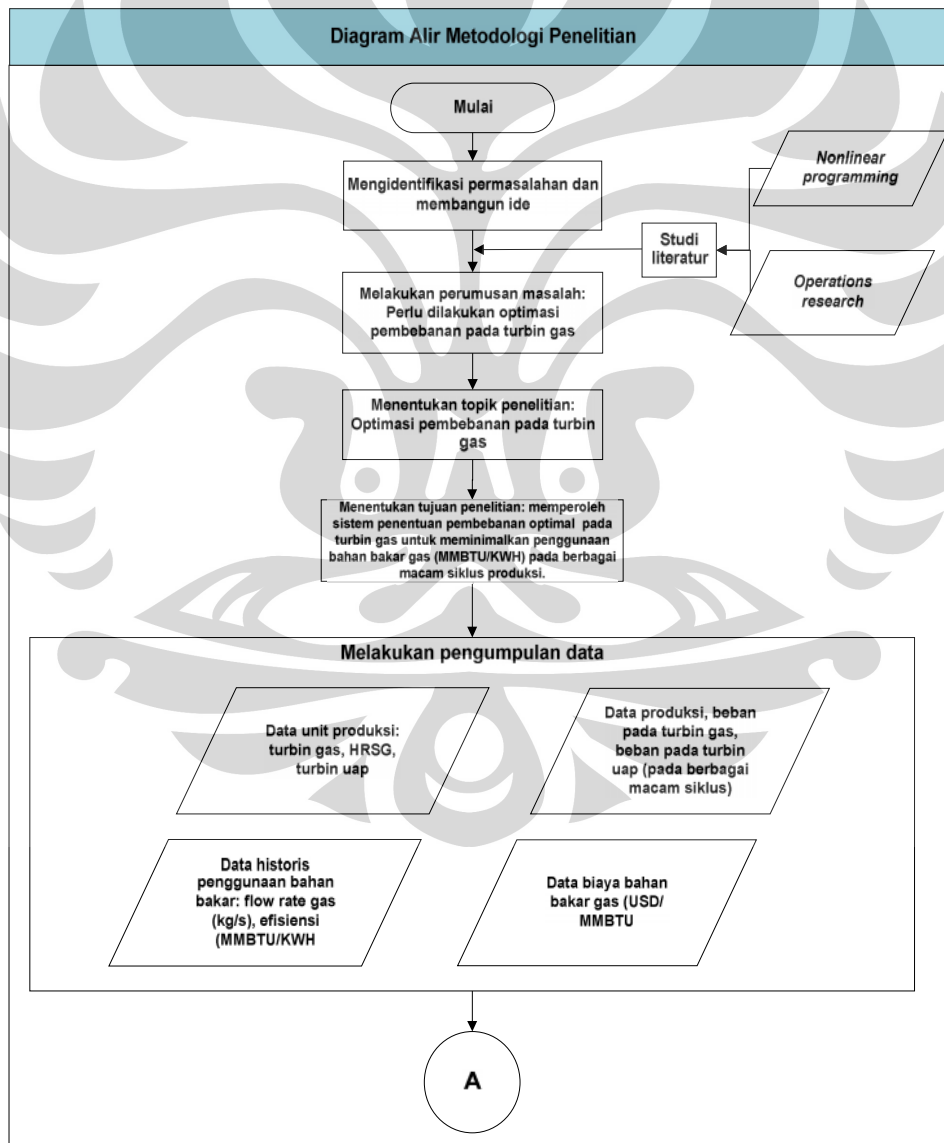
9. Analisa pengolahan data

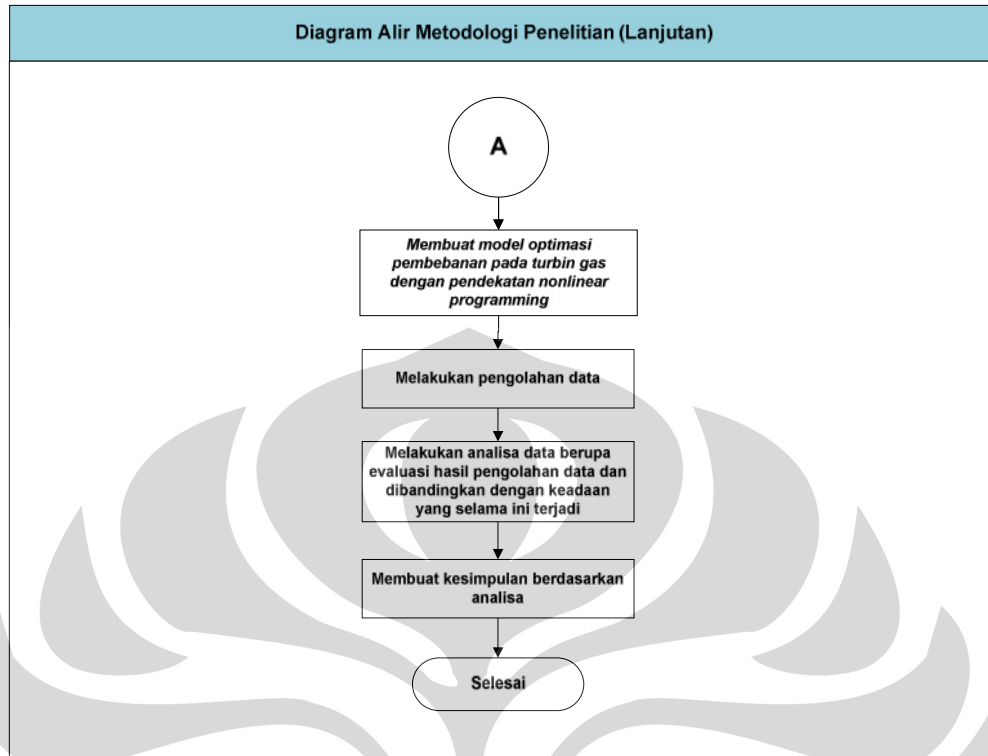
Dalam tahap ini dilakukan analisa terhadap hasil pengolahan data untuk dilihat perbaikannya dibandingkan dengan keadaan yang selama ini berlangsung di perusahaan tersebut.

10. Menarik kesimpulan

Dalam tahap ini akan dihasilkan kesimpulan mengenai keseluruhan penelitian. Kesimpulan dari penelitian ini merupakan ringkasan dari hasil pengolahan data dan analisis yang telah dilakukan sebelumnya.

Untuk menggambarkan secara sistematis, maka dibuat diagram alir metodologi penelitian yang dapat dilihat pada gambar 1.2.





Gambar 1.2. Diagram Alir Metodologi Penelitian

1.7 Sistematika Penelitian

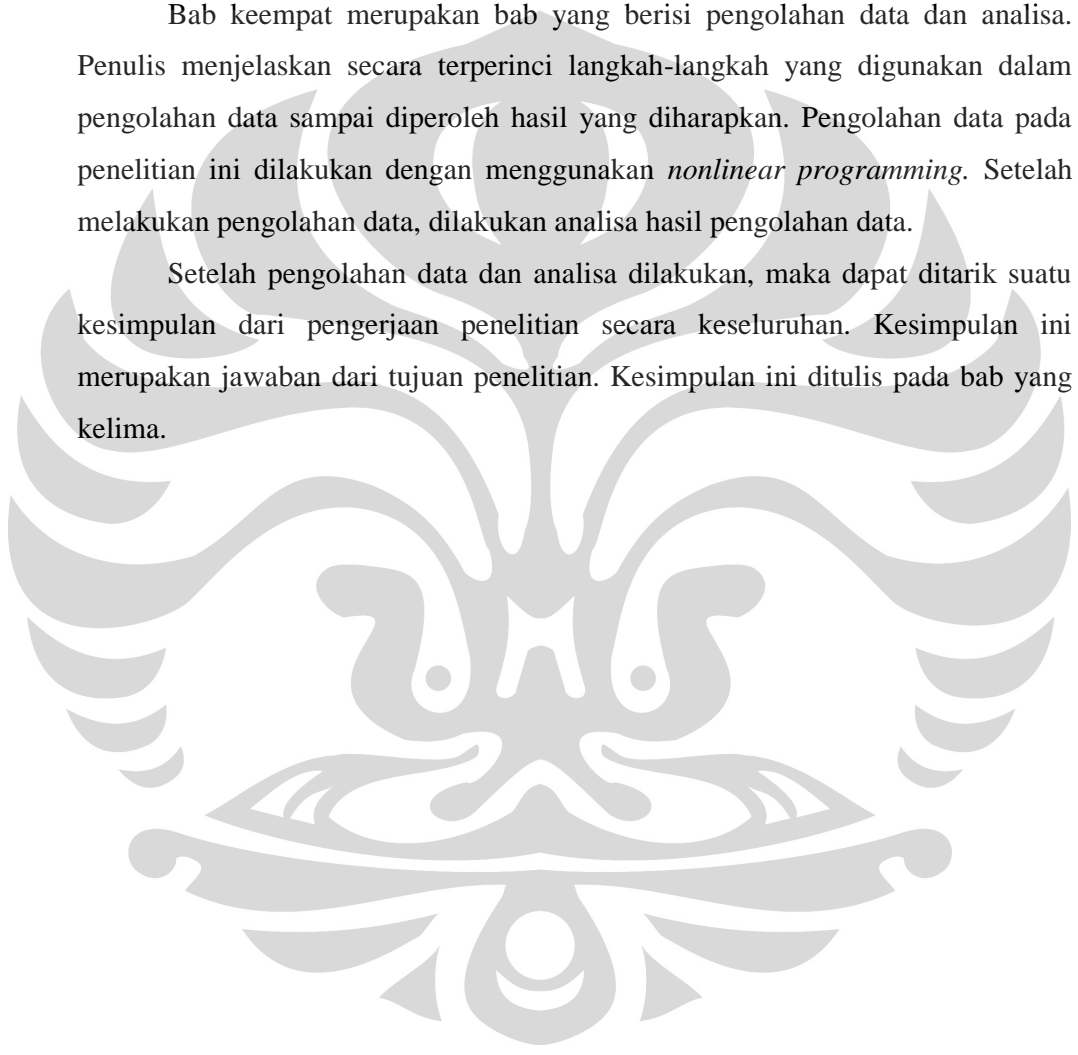
Untuk mempermudah pemahaman alur penelitian ini, maka penulisan penelitian mengenai optimasi beban pada turbin gas ditulis dalam beberapa bab. Bab pertama adalah Pendahuluan. Pada bab Pendahuluan, penulis menjelaskan mengenai latar belakang permasalahan yang menyebabkan dilakukannya penelitian ini. Selain itu, tujuan penelitian dan metodologi penelitian juga dipaparkan dalam bab ini. Penjelasan dalam bab Pendahuluan dilengkapi pula dengan diagram-diagram yang dapat menggambarkan alur permasalahan dan alur penelitian secara sistematis, yaitu diagram keterkaitan masalah dan diagram alir metodologi penelitian.

Pada bab kedua, penulis memaparkan dasar teori yang digunakan dalam mengerjakan penelitian ini. Landasan teori ini diperoleh dari tinjauan pustaka baik dari buku, jurnal, artikel, maupun informasi dari situs-situs di internet. Teori-teori yang dipakai meliputi teori tentang *operations research* dan *nonlinear programming*.

Bab ketiga berisi pengumpulan data yang dibutuhkan penulis dalam melakukan penelitian ini. Data-data tersebut adalah data sistem produksi *combine cycle*, unit turbin gas, unit turbin uap, unit HRSG, data historis perintah produksi (MW), data historis nilai beban pada tiap turbin gas, data historis pada turbin uap, data historis penggunaan bahan bakar (kg/s), data historis efisiensi (MMBTU/KWh), dan biaya bahan bakar gas (USD/MMBTU)

Bab keempat merupakan bab yang berisi pengolahan data dan analisa. Penulis menjelaskan secara terperinci langkah-langkah yang digunakan dalam pengolahan data sampai diperoleh hasil yang diharapkan. Pengolahan data pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *nonlinear programming*. Setelah melakukan pengolahan data, dilakukan analisa hasil pengolahan data.

Setelah pengolahan data dan analisa dilakukan, maka dapat ditarik suatu kesimpulan dari pengerjaan penelitian secara keseluruhan. Kesimpulan ini merupakan jawaban dari tujuan penelitian. Kesimpulan ini ditulis pada bab yang kelima.



BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 *Operations Research*

2.1.1 Sejarah *Operations Research*

Sejak revolusi industri, dunia telah mengalami pertumbuhan dalam ukuran dan kerumitan organisasi-organisasi yang ada. Revolusi ini telah memberikan peningkatan yang begitu besar dalam pembagian kerja dan segmentasi tanggung jawab manajemen dalam sebuah organisasi. Dampak dari perubahan ini begitu spektakuler. Namun, peningkatan spesialisasi ini telah menimbulkan permasalahan baru. Masalah pertama adalah kecenderungan beberapa komponen dari organisasi untuk berkembang sendiri dengan tujuan dan sistem nilai sendiri tetapi kehilangan pandangan tentang bagaimana aktifitas dan tujuannya berhubungan dengan organisasinya secara keseluruhan. Masalah lain yang timbul dengan kondisi meningkatnya spesialisasi dan kerumitan dalam sebuah organisasi adalah kesulitan untuk mengalokasikan sumber daya yang tersedia kepada aktifitas yang beragam dengan cara yang paling efektif. Penyelesaian permasalahan ketersediaan ini dengan mencari solusi yang terbaik sering disebut dengan *operations research*.²

Awal keberadaan OR dapat ditelusuri beberapa dekade ke belakang ketika dilakukan pendekatan ilmiah dalam manajemen organisasi. Aktifitas OR diawali ketika terjadi Perang Dunia II. Pada kondisi perang saat itu dibutuhkan pengalokasian sumber daya yang terbatas untuk berbagai operasi militer dengan cara yang paling efektif. Oleh karena itu, manajemen militer Inggris dan USA memanggil banyak ilmuwan untuk melakukan pendekatan ilmiah untuk mencari strategi lain.

Setelah perang berakhir, sukses OR mulai diterapkan di bidang selain militer. Pada awal 1950-an, para ilmuwan yang sukses menerapkan OR pada

² Frederick S. Hillier dan Gerald J. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, New York: McGraw-Hill, 2001, hal.1

Perang Dunia II, mulai memperkenalkan OR pada berbagai macam organisasi di dunia bisnis, industri, dan pemerintahan.³

Beberapa ahli, seperti *Morse* dan *Kimball* mendefinisikan *operations research* sebagai metode ilmiah (*scientific method*) yang memungkinkan para manajer mengambil keputusan mengenai kegiatan yang mereka tangani dengan dasar kuantitatif. Definisi ini kurang tegas karena tidak tercermin perbedaan antara *operations research* dengan disiplin ilmu yang lain.

Churchman, *Arkoff* dan *Arnoff* pada tahun 1950-an mengemukakan pengertian *operations research* sebagai aplikasi metode-metode, teknik-teknik dan peralatan-peralatan ilmiah dalam menghadapi masalah-masalah yang timbul di dalam operasi perusahaan dengan tujuan ditemukannya pemecahan yang optimum dari masalah-masalah tersebut.

Miller dan *M.K. Starr* mengartikan *operations research* sebagai peralatan manajemen yang menyatukan ilmu pengetahuan, matematika, dan logika dalam kerangka pemecahan masalah-masalah yang dihadapi sehari-hari, sehingga akhirnya permasalahan tersebut dapat dipecahkan secara optimal.

Ada 2 faktor yang memainkan peranan penting dalam perkembangan OR pada periode tersebut. Pertama adalah progres substansial terhadap perkembangan teknik OR. Setelah perang berlangsung, para ilmuwan termotivasi untuk melakukan riset pengembangan OR. Contoh utamanya adalah *simplex method* untuk menyelesaikan masalah *linear programming* yang dikembangkan oleh George Dantzig pada 1947. Beberapa pengembangan yang lain diantaranya *linear programming*, *dynamic programming*, teori antrian, teori inventori, yang dikembangkan sebelum akhir tahun 1950-an.

Faktor kedua yang mendukung perkembangan OR adalah perkembangan computer yang begitu pesat. Perhitungan dalam jumlah besar biasanya dibutuhkan untuk menyelesaikan masalah yang rumit. Mencari penyelesaiannya secara manual jelas membutuhkan waktu yang lama. Oleh karena itu dilakukanlah pengembangan computer yang dapat melakukan perhitungan aritmatika ribuan bahkan jutaan kali lebih cepat dari kemampuan manusia. Pada tahun 1980-an

³ Ibid. hal.2

telah muncul perangkat lunak untuk menyelesaikan OR dan berkembang sampai saat ini.⁴

2.1.2 Pengaruh Penggunaan *Operatiosn Research*

Operations Research memiliki pengaruh yang kuat dalam meningkatkan efisiensi berbagai macam organisasi di dunia. Pada prosesnya, OR telah memberikan kontribusi yang signifikan untuk meningkatkan produktifitas ekonomi dari berbagai Negara. Bahkan sekarang ada keanggotaan OR internasional yang tergabung dalam *International Federation of Operational Research Societies* (IFORS), dengan setiap negara anggotanya memiliki komunitas OR nasional.

Pengaruh dari OR terus berlanjut. Sebagai contoh, berdasarkan US *Bureau of Labor Statistic*, OR merupakan salah satu area dengan pertumbuhan karir tercepat untuk mahasiswa lulusan dari USA.⁵

2.1.3 Model Pendekatan *Operations Research*

Pendekatan yang dilakukan oleh OR dilakukan secara sistematis. Hal ini bertujuan untuk dapat menyelesaikan suatu permasalahan secara ilmiah sehingga dapat dipertanggungjawabkan validasinya. Berikut langkah-langkah dari pendekatan OR.

2.1.3.1 *Defining the Problem and Gathering Data*

Penyelesaian suatu masalah diawali dengan mendefinisikan masalah tersebut. Hal ini meliputi penentuan objektif, kendala, keterkaitan antara area yang sedang dipelajari dengan area lain dalam organisasi, kemungkinan alternatif yang dapat dilakukan, keterbatasan waktu dalam pengambilan keputusan, dan lain-lain. Proses dalam pendefinisian masalah menjadi sangat krusial karena membawa dampak yang besar terhadap kesimpulan yang akan diberikan karena sangatlah sulit untuk memberikan jawaban ‘benar’ terhadap masalah yang ‘salah’.⁶

⁴ Ibid. hal. 2

⁵ Ibid. hal. 2-3

⁶ Ibid. hal. 7

2.1.3.2 *Formulating a Mathematical Model*

Setelah mendefinisikan masalah, tahap selanjutnya adalah memformulasikan kembali masalah ke dalam bentuk yang mudah untuk di analisa. Pendekatan yang dilakukan oleh OR adalah dengan membangun model matematika yang merepresentasikan intisari dari masalah.

Model atau representasi ideal merupakan bagian dari kehidupan sehari-hari. Model memainkan peran penting dalam keilmuan dan bisnis, sebagai contoh model dari atom, model struktur genetik, persamaan matematika yang menggambarkan hukum gerak fisika atau reaksi kimia, and sistem akuntansi industri. Model juga menggambarkan keterkaitan dan membantu dalam tahap analisa.

Model matematika juga merupakan representasi ideal. Model ini diekspresikan dalam simbol matematika. Model matematika dalam permasalahan bisnis merupakan sistem persamaan yang menggambarkan intisari permasalahan. Jika terdapat n keputusan yang akan dibuat, modelnya akan direpresentasikan sebagai *decision variable* (x_1, x_2, \dots, x_n) yang merepresentasikan nilai yang akan ditentukan. Nilai yang tepat untuk sebuah *performance* nilai keuntungan misalnya, diekspresikan sebagai fungsi matematika dari *decision variable*, (sebagai contoh, $P = 3x_1 + 2x_2 + \dots + 5x_n$). Fungsi ini disebut *objective function*. Beberapa pembatasan yang dapat mempengaruhi *decision variable* juga diekspresikan secara matematis, biasanya dalam bentuk pertidaksamaan matematika (sebagai contoh, $x_1 + 3x_1x_2 + 2x_2 < 10$). Nilai pembatas ini disebut sebagai *constraints*. Konstanta dalam *constraints* dan *objective function* disebut parameter dalam model. Model matematika tersebut mencari nilai *decision variables* untuk dapat meminimalkan atau memaksimalkan *objective function*.⁷

2.1.3.3 *Deriving Solution From the Model*

Setelah memformulasikan model matematika untuk masalah yang ingin diselesaikan, tahap selanjutnya adalah mendapatkan solusi dari sebuah masalah berdasarkan model yang dibuat. Solusi yang di dapat merupakan solusi optimal atau yang terbaik. Solusi optimal didapat dari model yang digunakan. Hal yang

⁷ Ibid. hal. 10-11

perlu diperhatikan disini adalah bahwa model yang dibuat berdasarkan kondisi ideal dan berbeda dengan representasi mutlak dari kondisi masalah sebenarnya. Oleh karena itu, tidak ada garansi mutlak bahwa solusi berdasarkan model yang dibuat akan terbukti sebagai kemungkinan solusi terbaik yang dapat diimplementasikan untuk masalah sebenarnya. Mengapa demikian? Pada kondisi sebenarnya terlalu banyak faktor-faktor yang tidak dapat diperhitungkan. Namun, jika model telah diformulasikan dan dites dengan baik, maka solusi yang dihasilkan memiliki kecenderungan perkiraan yang baik pada kondisi ideal untuk masalah yang sebenarnya.

Menurut Herbert Simon, ilmuwan dalam bidang manajemen dan peraih Nobel di bidang ekonomi, kata *satisficing* memiliki arti lebih umum dibandingkan *optimizing*. Layaknya mata uang koin, kata *satisficing* merupakan kombinasi dari kata *satisfactory* dan *optimizing*.⁸

Perbedaan antara *optimizing* dan *satisficing* tercermin pada perbedaan antara teori dan realita. Samuel Eilon, salah satu pemimpin OR di Inggris mengatakan bahwa *Optimizing is the science of the ultimate; satisficing is the art of the feasible*.⁹

2.1.3.4 Testing the Model

Mengembangkan model matematika yang rumit sama halnya dengan mengembangkan sebuah program dalam komputer. Program ini harus dites untuk mengetahui kesalahan-kesalahan yang masih terjadi. Dengan mengetahui kesalahan-kesalahan yang masih ada kita dapat *improve* program yang sedang dikembangkan. Setelah melalui proses *improve* yang panjang, pembuat program baru dapat menyimpulkan bahwa program ini dapat memberikan hasil yang valid.

Sama halnya dengan sebuah model matematika. Pada awalnya sangatlah mungkin masih terdapat cacat pada model yang dibuat. Beberapa faktor yang berhubungan belum disertakan dalam model yang dibuat. Oleh karena itu,

⁸ Ibid. hal. 14

⁹ S. Eilon, "Goals and Constraints in Decision-making," *Operational Research Quarterly*, **23**: 3–15, 1972- Disampaikan saat konferensi tahunan Canadian Operational Research Society tahun 1971

sebelum model digunakan perlu dilakukan tes untuk mengidentifikasi cacat yang mungkin terjadi. Setelah melalui *improvement* yang panjang, baru dapat disimpulkan bahwa model yang sekarang teruji validasi hasilnya. Proses tes dan *improving* model untuk meningkatkan validitas biasa disebut dengan *model validation*.

Pada kondisi ini, memang sulit untuk menggambarkan apakah sebuah model sudah divalidasi. Proses ini sangat bergantung kepada sifat dari masalah yang menggunakan model tersebut.¹⁰

2.1.3.5 *Preparing Apply the Model*

Apa yang terjadi setelah model selesai dilakukan pengetesan? Jika model digunakan secara berulang, tahap selanjutnya adalah memasang sistem dokumen untuk mengaplikasikan model oleh manajemen. Sistem ini meliputi model, prosedur menuju solusi, dan prosedur operasi untuk pengimplementasian.

Sistem ini biasanya *computer-based*. *Database dan management information systems* menyediakan input untuk model setiap kali akan digunakan. Dalam kasus yang lain, sistem *interactive computer-based* yang disebut *decision support systems* dipasang untuk membantu manajemen menggunakan data dan model untuk mendukung pengambilan keputusan yang dibutuhkan.¹¹

2.1.3.6 *Implementation*

Setelah sistem dikembangkan untuk mengaplikasikan model, tahap terakhir adalah mengimplementasikan sistem tersebut. Tahap ini tergolong kritis karena hanya pada tahap ini keuntungan dari studi ini didapat. Oleh karena itu, hal ini sangat penting bagi tim pengembang untuk ikut menjalankan tahap ini untuk memastikan bahwa solusi yang diberikan model dapat dengan baik diterjemahkan ke dalam prosedur operasi dan untuk memperbaiki cacat dari solusi yang disediakan.

Kesuksesan pengimplementasian tergantung dari dukungan antara manajemen tingkat atas dan manajemen operasi. Tugas tim pengembang lebih

¹⁰ Frederick S. Hillier dan Gerald J. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, New York: McGraw-Hill, 2001, hal. 17

¹¹ *Ibid.* hal. 18-19

kepada memberikan dukungan dan penjelasan terhadap studi yang mereka lakukan. Komunikasi yang baik juga membantu memastikan bahwa studi ini sesuai dengan yang diinginkan manajemen sehingga layak untuk diimplementasikan.¹²

2.2 *Nonlinear Programming*

Asumsi utama dari *linear programming* adalah semua fungsinya (*objective function* dan *constraint function*) bersifat linear. Asumsi ini dapat berlaku pada beberapa kondisi masalah tetapi tidak berlaku untuk jenis masalah yang lain. Pada faktanya, beberapa ahli ekonomi telah menemukan permasalahan yang bersifat nonlinear yang merupakan aturan dari masalah perencanaan ekonomi. Oleh karena itu, dibutuhkan juga fokus terhadap masalah yang bersifat nonlinear.

Bentuk utama dari *nonlinear programming* adalah untuk mencari $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ untuk mendapatkan

$$\text{Maksimum } f(x),$$

dengan kendala

$$g_i(x) \leq b_i, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, m,$$

dan

$$x \geq 0$$

(2.1)

dimana $f(x)$ dan $g_i(x)$ adalah sebuah fungsi dengan n *decision variables*.¹³

2.2.1 *Graphical Illustration of Nonlinear Programming Problems*

Ketika masalah *nonlinear programming* hanya memiliki satu atau dua variable, masalah tersebut dapat direpresentasikan secara grafik. Berikut ditampilkan beberapa jenis model permasalahan *nonlinear programming* yang ditampilkan secara grafik.¹⁴

¹² Ibid. hal. 20

¹³ Ibid. hal 654

¹⁴ Ibid. hal. 659-663

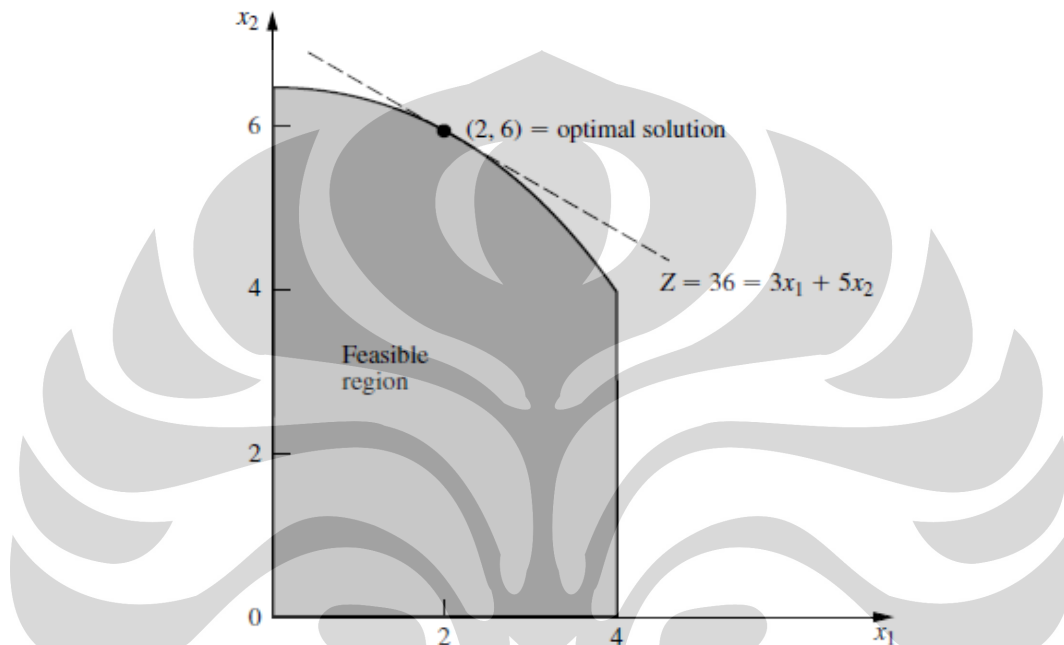
Constraint function berbentuk nonlinear.

$$\text{Objective function} \quad Z = 3x_1 + 5x_2$$

$$\text{Subject to} \quad x_1 \leq 4$$

$$9x_1^2 + 5x_2^2 \leq 216$$

$$\text{And} \quad x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \quad (2.2)$$



Gambar 2.1. Contoh Grafik dengan fungsi kendala nonlinear

Contoh lainnya untuk *objective function* yang berbentuk nonlinear.

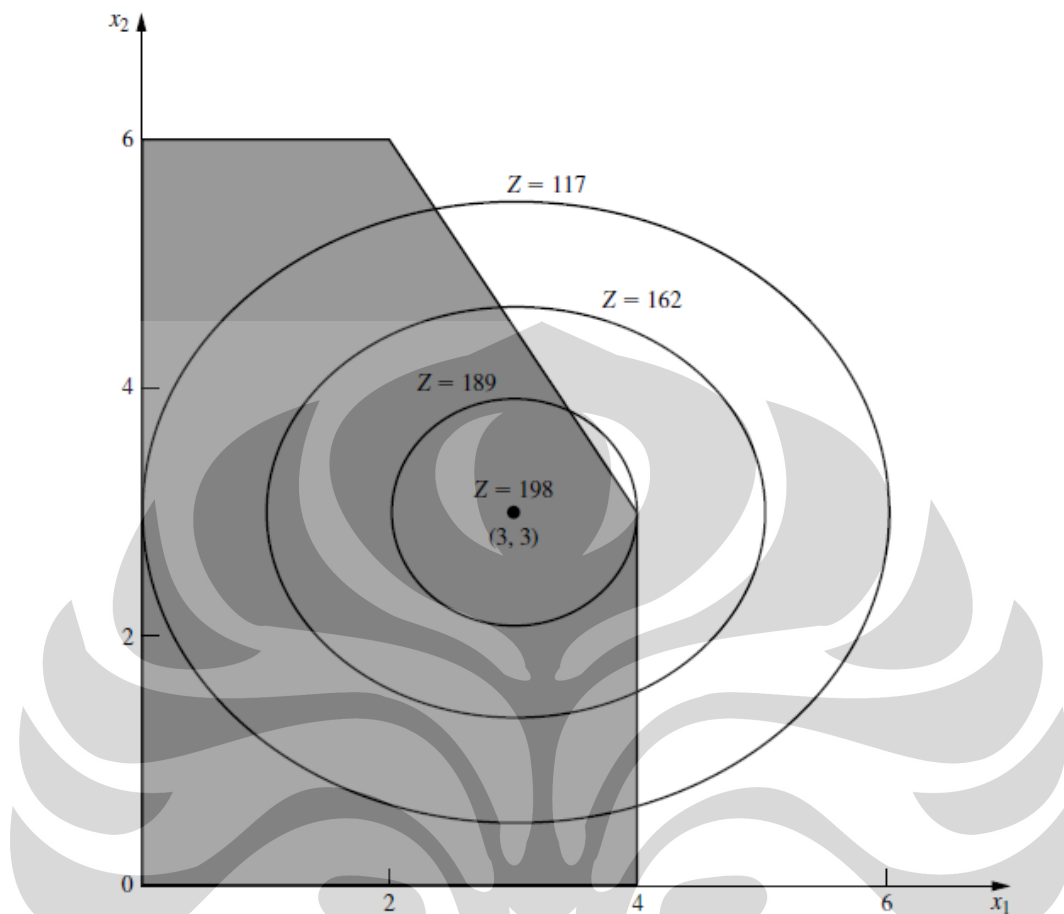
$$\text{Objective function} \quad Z = 54x_1 - 9x_1^2 + 78x_2 - 13x_2^2$$

$$\text{Subject to} \quad x_1 \leq 4$$

$$2x_2 \leq 12$$

$$3x_1 + 2x_2 \leq 18$$

$$\text{And} \quad x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \quad (2.3)$$



Gambar 2.2. Contoh grafik dengan fungsi tujuan nonlinear

Contoh lainnya untuk *constraint function* yang berbentuk nonlinear.

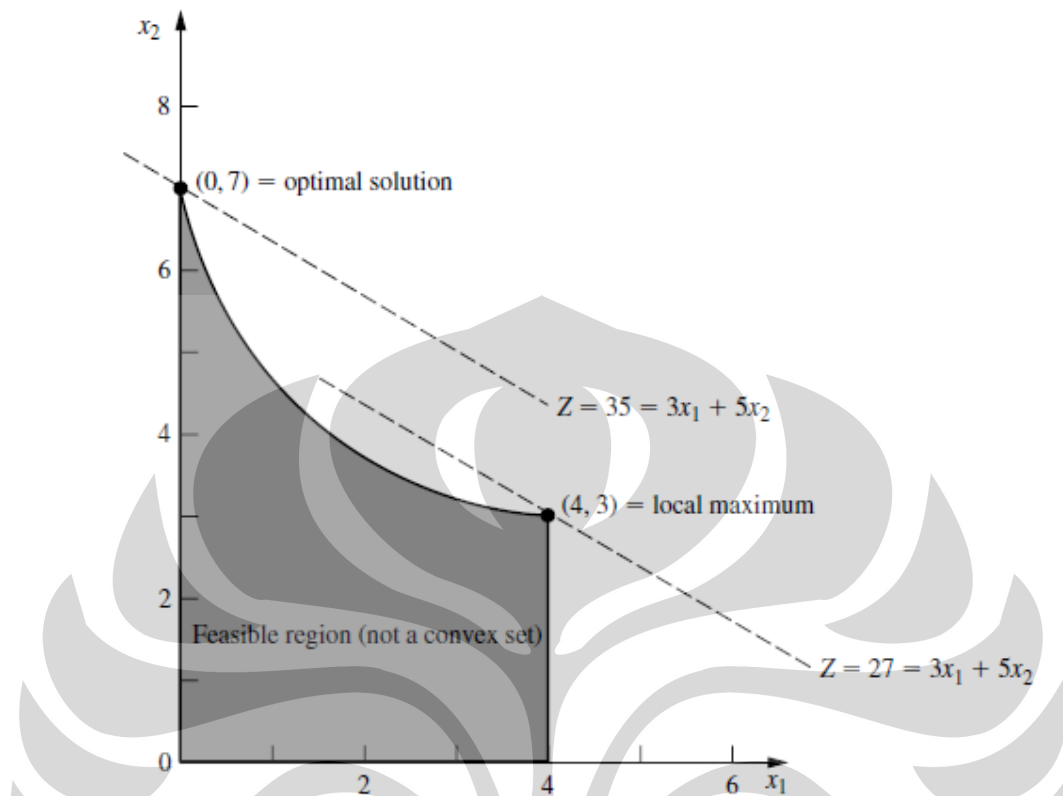
$$\text{Objective function} \quad Z = 3x_1 + 5x_2$$

$$\text{subject to} \quad x_1 \leq 4$$

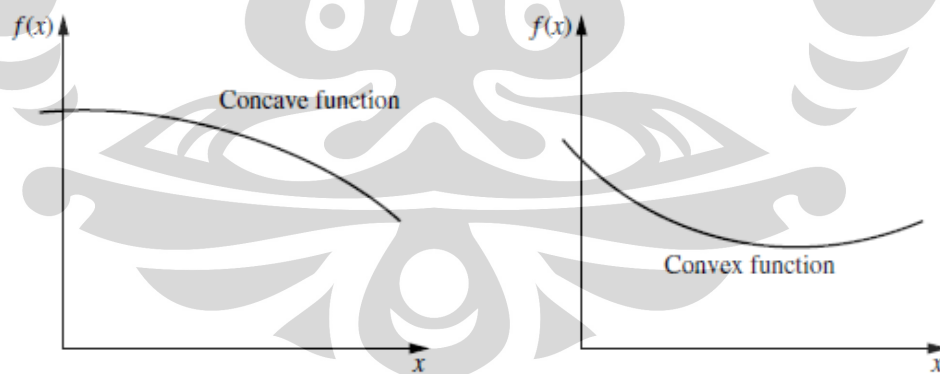
$$8x_1 - x_1^2 + 14x_2 - x_2^2 \leq 49$$

$$\text{And} \quad x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$$

(2.4)



Gambar 2.3. Contoh grafik fungsi kendala nonlinear



Gambar 2.4. Contoh grafik *concave function* dan *convex function*

2.2.2 Types of Nonlinear Programming Problems

Model masalah *nonlinear programming* memiliki berbagai macam bentuk. Tidak seperti metode simplex untuk *linear programming*, tidak ada satupun algoritma tertentu yang dapat menyelesaikan semua jenis permasalahan. Oleh

Universitas Indonesia

karena itu, terjadi pengembangan algoritma untuk menyelesaikan berbagai jenis masalah *nonlinear programming*.

2.2.2.1 Unconstrained Optimization

Unconstrained Optimization tidak memiliki fungsi kendala sehingga langsung kepada fungsi objektifnya.

Maximize $f(x)$, untuk semua nilai $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

Solusi $x = x^*$ akan optimal ketika $f(x)$ merupakan fungsi diferensialnya:

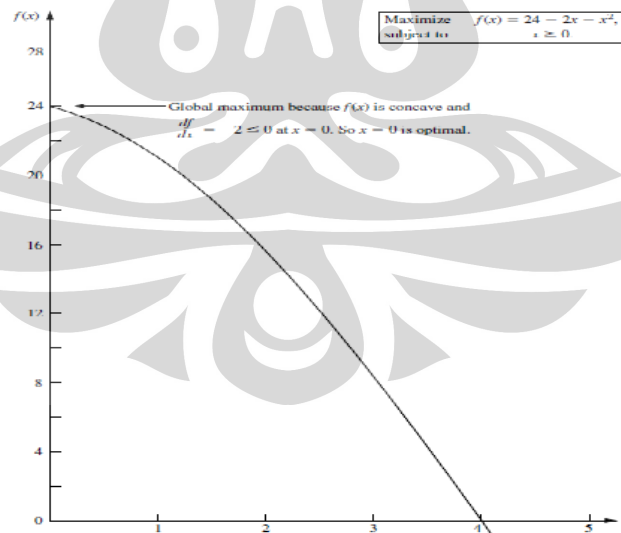
$$\frac{\partial y}{\partial x_j} = 0 \text{ untuk } x = x^*, \text{ untuk } j = 1, 2, \dots, n^{15}$$

2.2.2.2 Lineary Constrained Optimization

Karakteristik jenis ini adalah memiliki *constraint* yang linear tetapi *objective function* nya nonlinear¹⁶

2.2.2.3 Quadratic Programming

Jenis ini memiliki *constraint* yang linear tetapi *objective function* nya harus berbentuk *quadratic* (pangkat dua). Karakter lainnya adalah dalam masalah ini hanya memiliki dua variable. Berikut contoh dari *quadratic programming*.¹⁷



Gambar 2.5. *Quadratic programming*

¹⁵ Ibid. hal. 665

¹⁶ Ibid. hal. 665

¹⁷ Ibid. hal. 665-666

2.2.2.4 Convex Programming

Jenis ini merupakan jenis masalah khusus dimana $f(x)$ adalah *concave function*. Asumsi lain yang digunakan adalah:

- $f(x)$ merupakan *concave function*
- dan tiap $g_i(x)$ merupakan *convex function*¹⁸

2.2.2.5 Separable Programming

Jenis ini merupakan kasus special dari *convex programming* dengan tambahan satu asumsi bahwa fungsi $f(x)$ dan $g_i(x)$ adalah fungsi yang terpisah (*separable function*). *Separable function* adalah sebuah fungsi dimana tiap fungsinya memiliki variable tersendiri. Sebagai contoh, jika $f(x)$ *separable function*, maka dapat disimbolkan dengan:

$$f(x) = \sum_{j=1}^n f_j(x_j) \quad (2.5)$$

dimana setiap fungsi $f_j(x_j)$ hanya memiliki satu *jenis variable* x_j . Sebagai contoh *objective function* berikut:

$$f(x_1, x_2) = 126x_1 - 9x_1^2 + 182x_2 - 13x_2^2 \quad (2.6)$$

fungsi di atas merupakan fungsi yang terpisah dan dapat dinotasikan dengan

$$f(x_1, x_2) = f_1(x_1) + f_2(x_2) \quad (2.7)$$

dimana $f_1(x_1) = 126x_1 - 9x_1^2$ dan $f_2(x_2) = 182x_2 - 13x_2^2$. Keduanya memiliki *single variable*, yaitu x_1 dan x_2 .¹⁹

2.2.2.6 Nonconvex Programming

Jenis ini meliputi semua masalah *nonlinear programming* yang tidak menggunakan asumsi *convex programming*. Ketika menemukan *local maximum* belum tentu nilai tersebut merupakan nilai *global maximum*. Oleh karena itu, tidak ada algoritma yang menjamin akan dapat menemukan solusi optimal untuk semua jenis masalah.²⁰

¹⁸ Ibid. hal. 667

¹⁹ Ibid. hal. 667

²⁰ Ibid. hal. 668

2.2.2.7 Geometric programming

Ketika kita membuat model *nonlinear programming* untuk masalah *engineering design*, bentuk *objective* dan *constraint functions* yang ada sering kali berbentuk persamaan sebagai berikut:

$$g(x) = \sum_{i=1}^N c_i p_i(x) \quad (2.8)$$

dimana

$$p_i(x) = x_1^{a_{i1}}, x_2^{a_{i2}}, \dots, x_n^{a_{in}}$$

Dalam beberapa kasus c_i dan a_{ij} merepresentasikan nilai konstanta dan x_j merupakan *design variables*. Fungsi di atas bukan merupakan *convex* atau *concave* sehingga teknik *convex programming* tidak dapat diterapkan pada masalah *geometric problem*. Ada cara untuk mentransformasi masalah ini menjadi *convex programming* dengan catatan semua koefisien c_i harus bernilai positif sehingga fungsinya memiliki polinomial positif dan objektifnya mencari nilai minimal. *Decision variables* nya menjadi y_1, y_2, \dots, y_n , dengan perubahan sebagai berikut:

$$x_j = e^{y_j}, \text{ untuk } j = 1, 2, \dots, n \quad (2.9)$$

sehingga algoritma *convex programming* dapat diterapkan. Selain itu, prosedur solusi alternatif lain juga sudah dikembangkan untuk menyelesaikan bentuk persamaan polinomial.²¹

2.2.2.8 Fractional Programming

Jenis ini memiliki *objective function* dalam bentuk *fraction* atau merupakan perbandingan dari dua fungsi, seperti contoh berikut:

$$\text{Maximize } f(x) = \frac{f_1(x)}{f_2(x)} \quad (2.10)$$

Fungsi di atas dapat digunakan untuk mencari nilai maksimal dari perbandingan jumlah orang dengan jam yang tersedia (produktifitas) atau perbandingan keuntungan dengan modal yang telah ditanamkan (*rate of return*).²²

²¹ Ibid. hal. 668

²² Ibid. hal. 668-669

2.3 *One-Dimensional Search Procedure*

One-Dimensional Search Procedure merupakan sebuah metode untuk mendapatkan solusi yang optimal dari sebuah masalah dengan kondisi *unconstraint optimization*. Berikut langkah-langkah perhitungan (iterasi) dalam menggunakan *One-Dimensional Search Procedure*.²³

Langkah awal, ambil nilai error kemudian cari nilai x_1 dan x_2 dengan inspeksi. Tentukan nilai solusi sementara dengan cara $x' = \frac{x_1+x_2}{2}$.

- Evaluasi nilai $\frac{f(x)}{dx}$ pada $x = x'$
 - Jika nilai $\frac{f(x)}{dx} = 0$, ganti nilai $x_1 = x'$
 - Jika nilai $\frac{f(x)}{dx} = 0$, ganti nilai $x_2 = x'$
 - Ambil nilai $x' = \frac{x_1+x_2}{2}$
 - Iterasi berhenti ketika nilai $x_1 - x_2 = 2$, jika tidak lakukan iterasi lainnya
- x' = nilai solusi yang sedang dicoba
 x_1 = nilai batas bawah yang sedang dicoba berdasarkan x'
 x_2 = nilai batas atas yang sedang dicoba berdasarkan x'
 = nilai error untuk x' (ditentukan sendiri)

²³ Ibid. hal. 670-672

BAB 3

PENGUMPULAN DATA

3.1 Profil PT Pembangkit Jawa Bali

Sejarah PT Pembangkitan Jawa-Bali (PJB) berawal ketika Perusahaan Listrik dan Gas dibentuk pada tahun 1945, setelah Indonesia merdeka. Di tahun 1965, Perusahaan Listrik Negara dipisah dari Perusahaan Gas Negara. Pada tahun 1972, PLN menjadi Badan Usaha milik Negara dengan status Perusahaan Umum. Sepuluh tahun kemudian, tahun 1982, restrukturisasi dimulai di Jawa-Bali dengan pemisahan unit sesuai fungsinya, Unit PLN Distribusi dan Unit PLN Pembangkitan dan Penyaluran.

Pada tahun 1994, status PLN diubah menjadi Persero. Setahun kemudian, dilakukan restrukturisasi di dalam PT PLN (Persero) dengan membentuk dua anak perusahaan di bidang pembangkitan. Restrukturisasi tersebut bertujuan memisahkan misi sosial dan misi komersial yang diemban. Pada tanggal 3 Oktober 1995, PT Pembangkitan Tenaga Listrik Jawa-Bali II, atau yang lebih dikenal dengan nama PLN PJB II berdiri. Tujuan utama dibentuknya anak perusahaan ini adalah untuk menyelenggarakan usaha ketenagalistrikan yang bermutu tinggi serta handal berdasarkan prinsip industri dan niaga yang sehat dan efisien. Seiring dengan pengembangan strategi usaha, pada tahun 2000, PLN PJB II melakukan penyempurnaan organisasi dan mengubah nama menjadi PT Pembangkitan Jawa-Bali.

Saat ini, PJB memiliki 8 unit pembangkit dengan kapasitas terpasang 6.526 MW dan aset setara kurang lebih Rp 41,5 trilyun. Didukung 2.203 karyawan, PJB telah berkembang menjadi produsen energi listrik kelas dunia. Kapasitas, mutu, kehandalan dan layanan yang diberikan mampu memenuhi standar internasional. Berikut visi dan misi dari PT PJB.²⁴

Visi

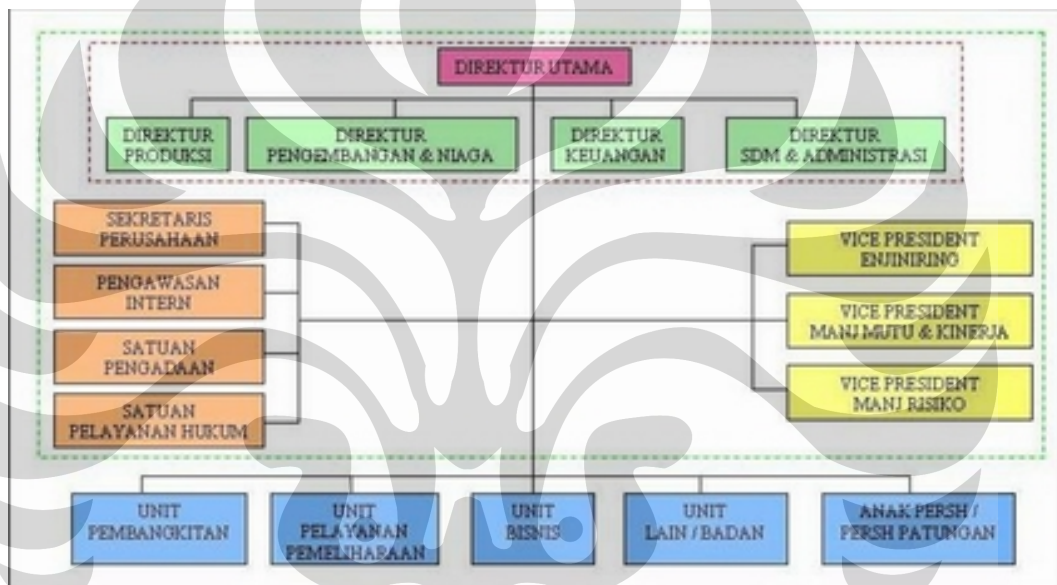
- Menjadi perusahaan pembangkit tenaga listrik Indonesia yang terkemuka dengan standar kelas dunia.

²⁴ <http://www.ptpjb.com/>

Misi

- Memproduksi tenaga listrik yang handal dan berdaya saing.
- Meningkatkan kinerja secara berkelanjutan melalui implementasi tata kelola pembangkitan dan sinergi *business partner* dengan metode *best practice* dan ramah lingkungan.
- Mengembangkan kapasitas dan kapabilitas SDM yang mempunyai kompetensi tehnik dan manajerial yang unggul serta berwawasan bisnis.

Berikut struktur organisasi dari PT PJB



Gambar 3.1. Struktur Organisasi PT Pembangkit Jawa Bali

3.1.1 Unit Pembangkit PT Pembangkit Jawa Bali

PT Pembangkit Jawa Bali memiliki beberapa unit pembangkit yang tersebar di hampir di seluruh pulau Jawa.

3.1.1.1 Unit Pembangkit Gresik

Organisasi Unit Pembangkitan Gresik mengoperasikan 5 unit Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), 4 unit Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), dan 3 unit Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) dengan total daya terpasang 2260,18 MW. Pembangkit yang beroperasi sejak tahun 1978 ini memasok sebagian besar beban di Jawa Timur. Setiap tahunnya UP Gresik mampu membangkitkan energi listrik 11.534 GWh yang kemudian disalurkan

Universitas Indonesia

melalui Jaringan Tegangan Tinggi (150 kV) dan Jaringan Tegangan Ekstra Tinggi (500 kV).

Jenis Pembangkit	PLTG	80,4	MW
	PLTU	600	MW
	PLTGU	1578,78	MW

Beberapa penghargaan untuk unit ini, diantaranya Pada tanggal 22 Januari 2002, UP Gresik meraih sertifikat ISO 9001 dari Lembaga akreditasi nasional SUCOFINDO. Di tahun yang sama UP Gresik juga mendapatkan sertifikat ISO 14001 dari Lembaga akreditasi nasional KEMA. Penghargaan Sistem Manajemen K3 (SMK3) diperoleh pada tahun 1997 & 2003. Selain itu, PLTGU Gresik Blok 1 juga berhasil menjadi PLTGU BBM/Gas percontohan.²⁵

3.1.1.2 Unit Pembangkit Muara Karang

Salah satu Organisasi Unit Pembangkitan PJB yang terletak di sebelah barat ini mengoperasikan 5 unit Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan 1 unit Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU). PLTU Muara Karang terletak di sebelah timur muara Sungai Karang, sementara PLTGU Muara Karang di sebelah barat muara Sungai Karang. Dengan total daya terpasang 1.208,58 MW, UP Muara Karang berperan utama dalam memenuhi kebutuhan listrik Ibukota Jakarta, terutama daerah-daerah VVIP seperti Istana Presiden, Gedung MPR/DPR. Setiap tahunnya energi listrik yang dibangkitkan 5.569,06 GWh yang kemudian disalurkan melalui Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi 500 / 150 kV ke sistem interkoneksi Jawa Bali.

Jenis Pembangkit	PLTU	700	MW
	PLTGU	508,58	MW

Beberapa penghargaan untuk unit ini, diantaranya, UP Muara Karang memperoleh sertifikat ISO 9001 pada tanggal 9 Juni 2003 & ISO 14001 pada tanggal 7 Januari 2004 dari lembaga akreditasi SAI Global. Penghargaan SMK3 juga berhasil didapat pada tahun 2001. Keberhasilan lainnya adalah dijadikannya PLTU Muara Karang Unit 2 sebagai PLTU BBM/Gas percontohan.²⁶

²⁵ <http://www.pjb.co.id/unit-pembangkit>

²⁶ Ibid

3.1.1.3 Unit Pembangkit Paiton

Unit Pembangkitan Paiton mengoperasikan 2 unit Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) batubara dengan total daya terpasang 800 MW. Setiap tahunnya energi listrik yang dibangkitkan 5.508,18 GWh yang kemudian disalurkan melalui Jaringan Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV ke sistem interkoneksi Jawa Bali. Pembangkit yang terpasang berjenis PLTU dengan daya 800 MW.

Beberapa penghargaan untuk unit ini, diantaranya dalam melakukan aktifitas produksinya, UP Paiton ramah lingkungan dengan tidak menimbulkan polusi. Ini terbukti dari sertifikat ISO 14001 di bidang Sistem Manajemen Lingkungan yang diterima dari lembaga akreditasi internasional KEMA Belanda pada tanggal 10 Januari 2001. Sertifikat ISO 9001 berhasil diraih pada 2 Agustus 2005 dari lembaga akreditasi BVQI. Sementara penghargaan SMK3 diperoleh pada tahun 1999 & 2002 dari TUV.²⁷

3.1.1.4 Unit Pembangkit Cirata

Unit Pembangkitan Cirata terletak di daerah Jawa barat, tepatnya di Desa Cadas Sari, Kecamatan Tegal Waru Plered Purwakarta. Berdiri sejak tahun 1988, UP Cirata mengoperasikan Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA) dengan daya 1008 MW. Air yang digunakan berasal dari Waduk(danau) Cirata yang bersumber dari aliran Sungai Citarum. Dengan 8 unit pembangkit, UP Cirata memiliki total daya terpasang 1.008 MW, dan mampu membangkitkan energi listrik rata-rata 1.132,72 GWh per tahun yang disalurkan melalui jaringan transmisi tegangan ekstra tinggi 500 KV ke sistem interkoneksi Jawa Bali.

UP Cirata merupakan PLTA terbesar di Asia Tenggara, dengan bangunan Power House 4 lantai di bawah tanah yang terletak di bawah gunung. Pegoperasian pembangkit ini dikendalikan dari ruang kontrol switchyard yang berjarak sekitar 2 km dari Power House di mana mesin-mesin pembangkit ditempatkan.

Beberapa penghargaan yang pernah diteruma, diantaranya UP Cirata mendapatkan sertifikat ISO 14001 pada tanggal 2 Juni 2003 dari KEMA.

²⁷ Ibid

Penghargaan SMK3 diperoleh pada tahun 1999 & 2002 dari TUV. Pada tanggal 23 Oktober 2003, UP Cirata meraih sertifikat ISO 9001 dan juara 2 PLTA Type Reservoir.²⁸

3.1.1.5 Unit Pembangkit Brantas

Unit PJB yang mengelola pembangkit listrik tertua adalah Organisasi Unit Pembangkitan Brantas. Unit ini mengoperasikan 12 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) yang tersebar di sepanjang aliran Sungai Konto dan Sungai Brantas Jawa Timur. Sebagian besar PLTA yang berada dalam kendali UP Brantas merupakan peninggalan jaman Belanda. Salah satunya bahkan sudah beroperasi sejak 70 tahun lalu.

Kedua belas PLTA itu adalah Sengguruh, Sutami, Selorejo, Ngebel, Tulungagung, Wlingi, Lodoyo, Mendalan, Siman, Giringan, Galang, dan Wonorejo. Total daya terpasang dari keseluruhan PLTA yang ada di UP Brantas adalah 281,38 MW. Setiap tahunnya energi listrik yang dibangkitkan sebesar 1.033,56 GWh. Seluruh energi yang dibangkitkan disalurkan melalui transmisi tegangan ekstra tinggi 500 kV ke sistem interkoneksi Jawa bali.

Beberapa penghargaan yang pernah diterima, diantaranya Pada tanggal 29 Mei 2004, UP Brantas meraih sertifikat ISO 9001 & 14001 dari KEMA. Sedangkan penghargaan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) diperoleh dari lembaga akreditasi TUV pada tahun 2000 & 2002.²⁹

3.1.1.6 Unit Pembangkit Muara Tawar

Organisasi Unit Pembangkitan Muara Tawar, merupakan unit PJB yang termuda. Pada mulanya UP Muara Tawar tergabung dalam kendali operasi UP Muara Karang, namun sejak tanggal 1 April 2003, UP Muara Tawar mulai berdiri sendiri. Dengan daya terpasang 920 MW, UP Muara tawar mengoperasikan 2 unit Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan 1 unit Pusat Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU). Rata-rata energi yang dibangkitkan per tahun 3.130,50 GWh. Seluruh

²⁸ Ibid

²⁹ Ibid

energi yang dibangkitkan disalurkan melalui transmisi tegangan ekstra tinggi 500 / 150 kV ke sistem interkoneksi Jawa-Madura-Bali.³⁰

Jenis Pembangkit	PLTG	280	MW
	PLTGU	640	MW

Unit pembangkit ini juga yang dijadikan sebagai tempat penelitian oleh penulis. Berikut persebaran unit pembangkit di seluruh pulau Jawa



Gambar 3.2. Persebaran unit pembangkit PT PJB

3.2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap dan Gas (PLTGU)

Pada penelitian ini, jenis pembangkit yang dijadikan sebagai objek penelitian adalah PLTGU. PLTGU adalah jenis pembangkit yang menggunakan bahan bakar gas dan tenaga uap untuk menghasilkan listrik. Pada bagian ini akan dibahas beberapa komponen penting dalam PLTGU dan mekanisme pembangkitan listrik.

3.2.1 Komponen dalam PLTGU

Berikut akan dijelaskan beberapa komponen penting dalam PLTGU untuk membangkitkan listrik.

3.2.1.1 Turbin Gas

Turbin gas adalah suatu alat yang memanfaatkan gas sebagai fluida untuk memutar turbin dengan pembakaran internal. Di dalam turbin gas, energi kinetik dikonversikan menjadi energi mekanik melalui udara bertekanan yang memutar

³⁰ Ibid

roda turbin sehingga menghasilkan daya. Sistem turbin gas yang paling sederhana terdiri dari tiga komponen yaitu kompresor, ruang bakar dan turbin gas.

Disain pertama turbin gas dibuat oleh John Wilkins seorang Inggris pada tahun 1791. Sistem tersebut bekerja dengan gas hasil pembakaran batu bara, kayu atau minyak, kompresornya digerakkan oleh turbin dengan perantara rantai roda gigi. Pada tahun 1872, Dr. F. Stolze merancang sistem turbin gas yang menggunakan kompresor aksial bertingkat ganda yang digerakkan langsung oleh turbin reaksi tingkat ganda. Tahun 1908, sesuai dengan konsepsi H. Holzworth, dibuat suatu sistem turbin gas yang mencoba menggunakan proses pembakaran pada volume konstan. Tetapi usaha tersebut dihentikan karena terbentur pada masalah konstruksi ruang bakar dan tekanan gas pembakaran yang berubah sesuai beban. Tahun 1904, "*Societe des Turbomoteurs*" di Paris membuat suatu sistem turbin gas yang konstruksinya berdasarkan disain Armengaud dan Lemate yang menggunakan bahan bakar cair. Temperatur gas pembakaran yang masuk sekitar 450 C dengan tekanan 45 atm dan kompresornya langsung digerakkan oleh turbin. Selanjutnya, pada tahun 1935 sistem turbin gas mengalami perkembangan yang pesat dimana diperoleh efisiensi sebesar kurang lebih 15%. Pesawat pancar gas yang pertama diselesaikan oleh "*British Thomson Houston Co*" pada tahun 1937 sesuai dengan konsepsi Frank Whittle (tahun 1930).

Prinsip kerja turbin gas secara umum dimulai saat udara masuk kedalam kompresor melalui saluran masuk udara (*inlet*). Kompresor berfungsi untuk menghisap dan menaikkan tekanan udara tersebut, sehingga temperatur udara juga meningkat. Kemudian udara bertekanan ini masuk kedalam ruang bakar. Di dalam ruang bakar dilakukan proses pembakaran dengan cara mencampurkan udara bertekanan dan bahan bakar. Proses pembakaran tersebut berlangsung dalam keadaan tekanan konstan sehingga dapat dikatakan ruang bakar hanya untuk menaikkan temperatur. Gas hasil pembakaran tersebut dialirkan ke turbin gas melalui suatu nozel yang berfungsi untuk mengarahkan aliran tersebut ke sudu-sudu turbin. Daya yang dihasilkan oleh turbin gas tersebut digunakan untuk memutar kompresornya sendiri dan memutar beban lainnya seperti generator listrik, dan lain-lain. Setelah melewati turbin ini gas tersebut akan dibuang keluar melalui saluran buang (*exhaust*).

Secara umum proses yang terjadi pada suatu sistem turbin gas adalah sebagai berikut:

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

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

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

Turbin gas dapat dibedakan berdasarkan siklusnya, konstruksi poros dan lainnya. Menurut siklusnya turbin gas terdiri dari:

1. Turbin gas siklus tertutup (*Close cycle*)
2. Turbin gas siklus terbuka (*Open cycle*)

Perbedaan dari kedua tipe ini adalah berdasarkan siklus fluida kerja. Pada turbin gas siklus terbuka, akhir ekspansi fluida kerjanya langsung dibuang ke udara atmosfer, sedangkan untuk siklus tertutup akhir ekspansi fluida kerjanya didinginkan untuk kembali ke dalam proses awal.

Dalam industri turbin gas umumnya diklasifikasikan dalam dua jenis yaitu :

1. Turbin Gas Poros Tunggal (*Single Shaft*)
Turbin jenis ini digunakan untuk menggerakkan generator listrik yang menghasilkan energi listrik untuk keperluan proses di industri.
2. Turbin Gas Poros Ganda (*Double Shaft*)
Turbin jenis ini merupakan turbin gas yang terdiri dari turbin bertekanan tinggi dan turbin bertekanan rendah, dimana turbin gas ini digunakan untuk menggerakkan beban yang berubah seperti kompresor pada unit proses.

Turbin gas tersusun atas komponen-komponen utama seperti *air inlet section*, *compressor section*, *combustion section*, *turbine section*, dan *exhaust section*. Sedangkan komponen pendukung turbin gas adalah *starting equipment*, *lube-oil system*, *cooling system*, dan beberapa komponen pendukung lainnya.

Berikut ini penjelasan tentang komponen utama turbin gas:

1. **Air Inlet Section.** Berfungsi untuk menyaring kotoran dan debu yang terbawa dalam udara sebelum masuk ke kompresor. Bagian ini terdiri dari:
 - *Air Inlet Housing*, merupakan tempat udara masuk dimana didalamnya terdapat peralatan pembersih udara.
 - *Inertia Separator*, berfungsi untuk membersihkan debu-debu atau partikel yang terbawa bersama udara masuk.
 - *Pre-Filter*, merupakan penyaringan udara awal yang dipasang pada inlet house.
 - *Main Filter*, merupakan penyaring utama yang terdapat pada bagian dalam inlet house, udara yang telah melewati penyaring ini masuk ke dalam kompresor aksial.
 - *Inlet Bellmouth*, berfungsi untuk membagi udara agar merata pada saat memasuki ruang kompresor.
 - *Inlet Guide Vane*, merupakan blade yang berfungsi sebagai pengatur jumlah udara yang masuk agar sesuai dengan yang diperlukan
2. **Compressor Section.** Komponen utama pada bagian ini adalah aksial flow compressor, berfungsi untuk mengkompresikan udara yang berasal dari inlet air section hingga bertekanan tinggi sehingga pada saat terjadi

pembakaran dapat menghasilkan gas panas berkecepatan tinggi yang dapat menimbulkan daya output turbin yang besar. Aksial flow compressor terdiri dari dua bagian yaitu:

- *Compressor Rotor Assembly*. Merupakan bagian dari kompresor aksial yang berputar pada porosnya. Rotor ini memiliki 17 tingkat sudu yang mengompresikan aliran udara secara aksial dari 1 atm menjadi 17 kalinya sehingga diperoleh udara yang bertekanan tinggi. Bagian ini tersusun dari wheels, stubshaft, tie bolt dan sudu-sudu yang disusun kosentris di sekeliling sumbu rotor.
- *Compressor Stator*. Merupakan bagian dari casing gas turbin yang terdiri dari:
 - *Inlet Casing*, merupakan bagian dari casing yang mengarahkan udara masuk ke inlet bellmouth dan selanjutnya masuk ke inlet guide vane.
 - *Forward Compressor Casing*, bagian casing yang didalamnya terdapat empat stage kompresor blade.
 - *Aft Casing*, bagian casing yang didalamnya terdapat compressor blade tingkat 5-10.
 - *Discharge Casing*, merupakan bagian casing yang berfungsi sebagai tempat keluarnya udara yang telah dikompresi.

3. **Combustion Section.** Pada bagian ini terjadi proses pembakaran antara bahan bakar dengan fluida kerja yang berupa udara bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi. Hasil pembakaran ini berupa energi panas yang diubah menjadi energi kinetik dengan mengarahkan udara panas tersebut ke transition pieces yang juga berfungsi sebagai nozzle. Fungsi dari keseluruhan sistem adalah untuk mensuplai energi panas ke siklus turbin. Sistem pembakaran ini terdiri dari komponen-komponen berikut yang jumlahnya bervariasi tergantung besar frame dan penggunaan turbin gas. Komponen-komponen itu adalah :

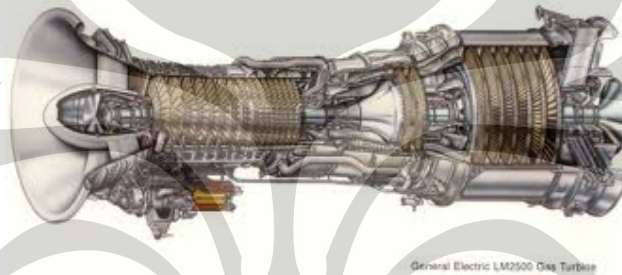
- *Combustion Chamber*, berfungsi sebagai tempat terjadinya pencampuran antara udara yang telah dikompresi dengan bahan bakar yang masuk.

- *Combustion Liners*, terdapat didalam combustion chamber yang berfungsi sebagai tempat berlangsungnya pembakaran.
- *Fuel Nozzle*, berfungsi sebagai tempat masuknya bahan bakar ke dalam combustion liner.
- *Ignitors (Spark Plug)*, berfungsi untuk memercikkan bunga api ke dalam combustion chamber sehingga campuran bahan bakar dan udara dapat terbakar.
- *Transition Pieces*, berfungsi untuk mengarahkan dan membentuk aliran gas panas agar sesuai dengan ukuran nozzle dan sudu-sudu turbin gas.
- *Cross Fire Tubes*, berfungsi untuk meratakan nyala api pada semua combustion chamber.
- *Flame Detector*, merupakan alat yang dipasang untuk mendeteksi proses pembakaran terjadi.

4. **Turbin Section.** Turbin section merupakan tempat terjadinya konversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang digunakan sebagai penggerak compresor aksial dan perlengkapan lainnya. Dari daya total yang dihasilkan kira-kira 60 % digunakan untuk memutar kompresornya sendiri, dan sisanya digunakan untuk kerja yang dibutuhkan. Komponen-komponen pada turbin section adalah sebagai berikut :

- *Turbin Rotor Case*
- *First Stage Nozzle*, yang berfungsi untuk mengarahkan gas panas ke first stage turbine wheel.
- *First Stage Turbine Wheel*, berfungsi untuk mengkonversikan energi kinetik dari aliran udara yang berkecepatan tinggi menjadi energi mekanik berupa putaran rotor.
- *Second Stage Nozzle dan Diafragma*, berfungsi untuk mengatur aliran gas panas ke second stage turbine wheel, sedangkan diafragma berfungsi untuk memisahkan kedua turbin wheel.
- *Second Stage Turbine*, berfungsi untuk memanfaatkan energi kinetik yang masih cukup besar dari first stage turbine untuk menghasilkan kecepatan putar rotor yang lebih besar.

5. **Exhaust Section.** Exhaust section adalah bagian akhir turbin gas yang berfungsi sebagai saluran pembuangan gas panas sisa yang keluar dari turbin gas. Exhaust section terdiri dari beberapa bagian yaitu : (1) Exhaust Frame Assembly, dan (2) Exhaust gas keluar dari turbin gas melalui exhaust diffuser pada exhaust frame assembly, lalu mengalir ke exhaust plenum dan kemudian didifusikan dan dibuang ke atmosfer melalui exhaust stack, sebelum dibuang ke atmosfer gas panas sisa tersebut diukur dengan exhaust thermocouple dimana hasil pengukuran ini digunakan juga untuk data pengontrolan temperatur dan proteksi temperatur trip. Pada exhaust area terdapat 18 buah termokopel yaitu, 12 buah untuk temperatur kontrol dan 6 buah untuk temperatur trip.³¹



Gambar 3.3. Turbin gas

3.2.1.2 Turbin Uap

Turbin uap adalah suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial menjadi energi kinetik dan energi kinetik ini selanjutnya diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin langsung atau dengan bantuan elemen lain, dihubungkan dengan mekanisme yang digerakkan. Tergantung dari jenis mekanisme yang digerakkan turbin uap dapat digunakan pada berbagai bidang industri, seperti untuk pembangkit listrik.

Turbin uap merupakan salah satu jenis mesin yang menggunakan metode external combustion engine (mesin pembakaran luar). Pemanasan fluida kerja (uap) dilakukan di luar sistem. Prinsip kerja dari suatu instalasi turbin uap secara umum adalah dimulai dari pemanasan air pada ketel uap. Uap air hasil pemanasan yang bertemperatur dan bertekanan tinggi selanjutnya digunakan untuk

³¹ <http://majarimagazine.com/2009/02/gas-turbine-engine-part-1/> dan <http://majarimagazine.com/2009/02/gas-turbine-engine-part-2/>

menggerakkan poros turbin. Uap yang keluar dari turbin selanjutnya dapat dipanaskan kembali atau langsung disalurkan ke kondensor untuk didinginkan. Pada kondensor uap berubah kembali menjadi air dengan tekanan dan temperatur yang telah menurun. Selanjutnya air tersebut dialirkan kembali ke ketel uap dengan bantuan pompa. Dari penjelasan diatas dapat disimpulkan bahwa turbin uap adalah mesin pembangkit yang bekerja dengan sistem siklus tertutup.³²

Secara umum komponen-komponen utama dari sebuah turbin uap adalah:³³

1. Nosel, sebagai media ekspansi uap yang merubah energi potensial menjadi energi kinetik.
2. Sudu, alat yang menerima gaya dari energi kinetik uap melalui nosel.
3. Cakram, tempat sudu-sudu dipasang secara radial pada poros.
4. Poros, sebagai komponen utama tempat dipasangnya cakram-cakram sepanjang sumbu.
5. Bantalan, bagian yang berfungsi untuk menyokong kedua ujung poros dan banyak menerima beban.
6. Kopling, sebagai penghubung antara mekanisme turbin uap dengan mekanisme yang digerakkan.



Gambar 3.4. Turbin uap

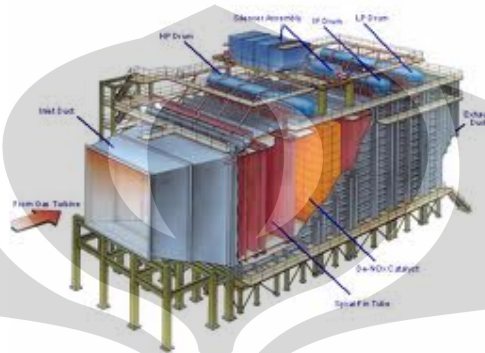
3.2.1.3 Heat Recovery Steam Generator

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

³² <http://www.rider-system.net/2009/10/turbin-uap.html>

³³ Ibid

turbin uap. Biasanya HRSG dipasang dalam pembangkit listrik dengan sistem *combine cycle*. Pada sistem ini, udara panas hasil dari turbin gas dialirkan ke HRSG untuk menghasilkan uap yang akan memutar turbin uap. Aplikasi HRSG lainnya adalah pada pembangkit yang menggunakan mesin disel. Hasil dari mesin disel dengan temperatur yang tinggi dialirkan ke HRSG untuk menghasilkan uap untuk menggerakkan turbin uap.³⁴



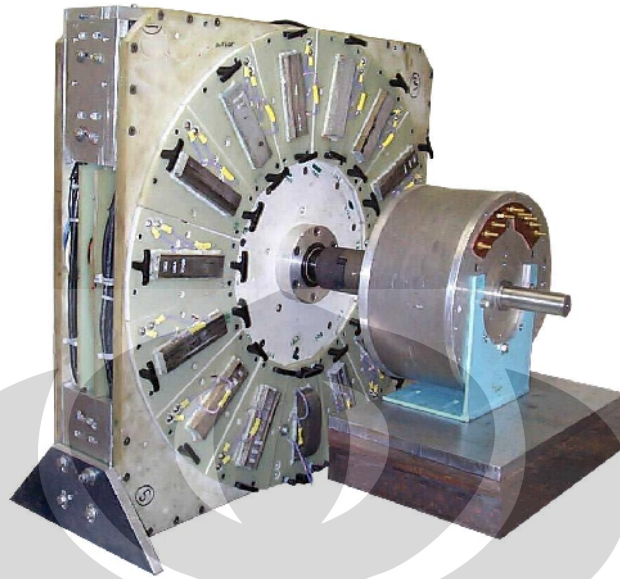
Gambar 3.5. *Heat Recovery Steam Generator*

3.2.1.4 Generator

Generator listrik adalah sebuah alat yang memproduksi energi listrik dari sumber energi mekanikal, biasanya dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Proses ini dikenal sebagai pembangkit listrik. Walau generator dan motor punya banyak kesamaan, tapi motor adalah alat yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Generator mendorong muatan listrik untuk bergerak melalui sebuah sirkuit listrik eksternal, tapi generator tidak menciptakan listrik yang sudah ada di dalam kabel lilitannya. Hal ini bisa dianalogikan dengan sebuah pompa air, yang menciptakan aliran air tapi tidak menciptakan air di dalamnya. Sumber energi mekanik bisa berupa resiprokat maupun turbin mesin uap, air yang jatuh melakuai sebuah turbin maupun kincir air, mesin pembakaran dalam, turbin angin, engkol tangan, energi surya atau matahari, udara yang dimampatkan, atau apapun sumber energi mekanik yang lain.³⁵

³⁴ www.in.wikipedia.com

³⁵ www.in.wikipedia.com



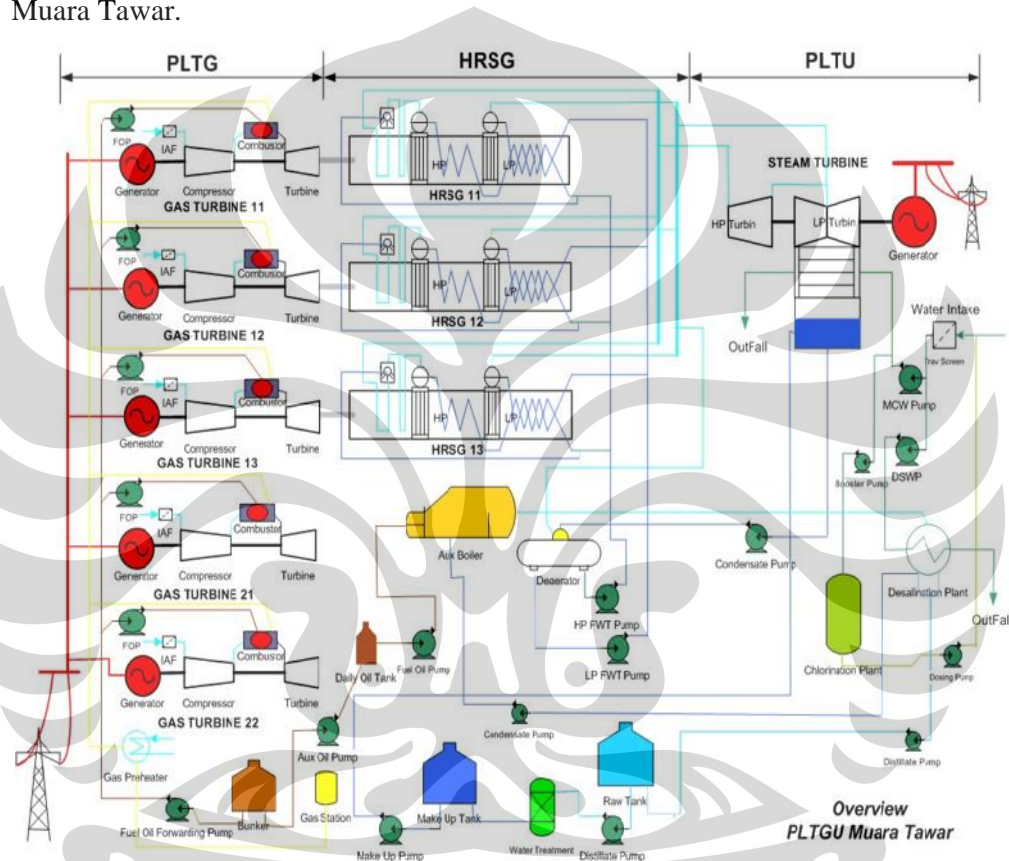
Gambar 3.6. *Generator*

3.2.2 Proses Produksi Listrik pada PLTGU

PLTGU merupakan suatu instalasi peralatan yang berfungsi untuk mengubah energi panas (hasil pembakaran bahan bakar dan udara) menjadi energi listrik. Pada dasarnya, sistem PLTGU ini merupakan penggabungan antara PLTG dan PLTU. PLTU memanfaatkan energi panas dan uap dari gas buang hasil pembakaran di PLTG untuk memanaskan air di HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*), sehingga menjadi uap jenuh kering. Uap jenuh kering inilah yang akan digunakan untuk memutar sudu (baling-baling) pada turbin uap. Gas yang dihasilkan dalam ruang bakar pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) akan menggerakkan turbin dan kemudian generator, yang akan mengubahnya menjadi energi listrik. Bahan bakar PLTG bisa berwujud cair (BBM) maupun gas (gas alam). Penggunaan bahan bakar menentukan tingkat efisiensi pembakaran dan prosesnya. Prinsip kerja PLTG berawal ketika udara dimasukkan dalam kompresor melalui air filter / penyaring udara agar partikel debu tidak ikut masuk ke dalam kompresor tersebut. Pada kompresor tekanan udara dinaikkan lalu dialirkan ke ruang bakar untuk dibakar bersama bahan bakar. Jika menggunakan BBG, gas bisa langsung dicampur dengan udara untuk dibakar. Tapi jika menggunakan BBM harus dilakukan proses pengabutan dahulu pada burner baru

dicampur udara dan dibakar. Pembakaran bahan bakar dan udara ini akan menghasilkan gas bersuhu dan bertekanan tinggi yang berenergi (enthalpy). Gas ini lalu disemprotkan ke turbin, hingga enthalpy gas diubah oleh turbin menjadi energi gerak yang memutar generator untuk menghasilkan listrik.

Seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa objek penelitian ini adalah PLTGU PT PJB unit Muara Tawar. Berikut skema dari PLTGU PT PJB unit Muara Tawar.



Gambar 3.7. Skema PLTGU PT PJB unit Muara Tawar

3.3 Data yang Dibutuhkan

Tujuan dari penelitian ini adalah memperoleh beban optimal pada turbin gas sehingga dibutuhkan data-data dari perusahaan, seperti unit pembangkit yang terinstalasi, data historis produksi dan beban yang terjadi pada turbin gas serta turbin uap, data historis penggunaan bahan bakar gas, dan data biaya bahan bakar gas dalam satuan MMBTU/KWh.

3.3.1 Unit Pembangkit

Berikut daftar unit pembangkit pada blok 1 PT PJB unit Muara Tawar.

Tabel 3.1. Daftar Unit Pembangkit

No.	Alat atau Unit Produksi	Jumlah
1.	Turbin gas	3
2.	<i>Heat Recovery Steam Generator</i>	3
3.	Tubin uap	1
4.	Generator	4

3.3.2 Data Historis Produksi dan Beban pada Turbin

Data yang dijadikan sampel penelitian adalah data selama bulan Maret 2010. Data ini menggambarkan jumlah listrik yang dihasilkan pada blok 1 PT PJB unit Muara Tawar pada siklus *combine cycle* dan kondisi beban pada masing-masing turbin gas serta beban yang dihasilkan oleh turbin uap. Berikut contoh data pada bulan Maret 2010 untuk siklus *combine cycle*.

Tabel 3.2. Data Produksi dan Beban pada Turbin

No	Turbin Gas 1 (MW)	Turbin Gas 2 (MW)	Turbin Gas 3 (MW)	Turbin Uap (MW)	Σ Produksi
1	139.55	141.14	96.72	193.61	571.02
2	135.90	136.13	135.31	207.80	615.14
3	137.66	138.13	137.52	213.13	626.44
4	139.40	140.80	139.61	214.66	634.47
5	130.51	130.36	130.41	208.58	599.86
6	130.19	130.16	130.36	207.40	598.11
7	127.69	124.80	119.07	204.92	576.48
8	137.70	139.13	89.63	177.96	544.42
9	138.11	139.61	119.78	201.33	598.83
10	137.74	139.63	139.29	209.39	626.05
11	137.87	139.91	139.06	211.08	627.92
12	138.99	140.93	139.69	211.60	631.21
13	138.81	140.64	139.25	212.43	631.13
14	139.02	140.58	139.18	212.57	631.35
15	138.71	140.89	139.66	213.22	632.48

Tabel 3.2. Data Produksi dan Beban pada Turbin (Lanjutan)

16	138.87	140.99	139.82	211.68	631.36
17	139.11	141.02	139.82	210.91	630.86
18	139.04	141.03	139.93	211.01	631.01
19	139.46	141.23	139.95	211.14	631.78
20	139.41	141.30	139.91	211.14	631.76
21	139.68	141.53	140.43	211.26	632.90
22	139.75	141.40	140.54	211.45	633.14
23	139.84	141.68	132.96	210.82	625.30
24	139.76	124.46	100.06	200.10	564.38
25	95.14	90.18	90.27	173.72	449.31
26	7.95	90.21	90.18	117.88	306.22
27	107.33	94.98	107.01	172.74	482.06
28	131.16	133.23	132.45	196.97	593.81
29	137.06	139.17	139.10	211.69	627.02
30	136.18	138.64	133.86	211.18	619.86
31	136.29	136.90	133.20	208.45	614.84
32	136.68	138.70	138.72	212.36	626.46
33	136.78	138.72	138.72	212.94	627.16
34	136.84	138.98	138.88	213.01	627.71
35	136.69	138.83	138.75	212.74	627.01
36	136.30	138.90	138.84	212.48	626.52
37	136.05	138.66	138.64	212.17	625.52
38	136.57	138.78	138.70	212.08	626.13
39	136.84	138.95	138.80	211.81	626.40
40	136.79	139.02	139.01	211.26	626.08
41	136.08	138.00	138.13	211.23	623.44
42	120.33	120.07	120.36	194.81	555.57
43	120.25	120.08	120.23	181.78	542.34
44	120.12	120.20	120.11	185.46	545.89
45	120.31	120.11	120.27	185.20	545.89
46	128.59	129.17	129.16	191.28	578.20
47	137.86	139.84	140.02	207.67	625.39
48	137.24	139.38	139.51	209.97	626.10
49	137.75	139.70	139.85	210.36	627.66
50	137.80	139.71	139.94	213.11	630.56

3.3.3 Data Penggunaan Bahan Bakar Gas

Data berikut merupakan contoh penggunaan bahan bakar gas untuk turbin gas.

Tabel 3.3. Data Penggunaan Bahan Bakar Gas pada Turbin Gas 1

Active Power (MW)	Fuel Gas Flow (kg/s)	Fuel Gas Flow (MMSCF/h)	Energy (MMBTU/h)	SFC (MMBTU/KWh)
70.01999664	5.71999979	0.896122104	1012.617978	0.01446184
75.54000092	5.849999905	0.916488534	1035.632044	0.013709717
80.98000336	6.03000021	0.94468823	1067.497699	0.013182238
87.05999756	6.46999979	1.013620636	1145.391319	0.013156344
90.01999664	6.369999886	0.99795418	1127.688223	0.012527086
95.75	6.639999866	1.040253648	1175.486623	0.012276623
99.91000366	6.78000021	1.062186762	1200.271041	0.012013522
104.9400024	7.039999962	1.102919547	1246.299088	0.011876301
105.0599976	7.059999943	1.106052838	1249.839707	0.011896438
110	7.440000057	1.165585446	1317.111554	0.011973741
114.9100037	7.550000191	1.182818585	1336.585001	0.011631581
119.8199997	7.670000076	1.201618332	1357.828715	0.011332238
124.6800003	8.010000229	1.254884357	1418.019323	0.01137327
129.9400024	8.399999619	1.315983498	1487.061353	0.011444215
134.9900055	8.680000305	1.359849724	1536.630188	0.011383289
140	8.729999542	1.36768284	1545.481609	0.011039154
142.1600037	8.930000305	1.399015901	1580.887969	0.011120483

3.3.4 Data Biaya Bahan Bakar Gas

Data ini merupakan biaya bahan bakar gas dalam satuan energi (MMBTU/KWh). Biaya tiap MMBTUnya sekitar USD 4.18. Biaya ini yang nanti akan dibandingkan antara penggunaan sebelum dan sesudah optimasi beban pada turbin gas.

3.3.5 Data Total Produksi Listrik

Data ini menunjukkan jumlah produksi listrik per bulan PT PJB Unit Muara Tawar dalam satuan KWh.

BAB 4

PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA

4.1 Pengolahan Data

Pada bagian ini akan dijelaskan tentang model matematika yang digunakan untuk menyelesaikan masalah ini, yaitu dengan menggunakan *nonlinear programming*. Setelah itu akan dilakukan input data berdasarkan model matematika yang telah dibuat. Data yang diinput adalah data bulan Maret 2010 pada kondisi *combine cycle*. Hasil pengolahan data ini akan dibandingkan dengan kondisi sebelum dilakukannya optimasi beban pada turbin gas.

4.1.1 Penyusunan Model Matematika

Model matematika ini akan menggambarkan siklus *combine cycle* dimana unit HRSG dalam keadaan beroperasi semua sehingga panas hasil pembakaran dari turbin gas dapat disalurkan semuanya untuk menggerakkan turbin uap. Pada kondisi ini, semua turbin yang ada dapat menggerakkan generator untuk dapat membangkitkan listrik.

Model matematika ini disusun dengan menentukan dua fungsi utama, yaitu *objective function* dan *constraints function*.

1. *Objective function*

Objective function dari masalah ini adalah untuk mencari nilai minimal dari penggunaan bahan bakar gas dalam satuan energi MMBTU/KWh. Penggunaan bahan bakar ini dipengaruhi oleh beban yang diperintahkan kepada turbin gas untuk memenuhi perintah produksi yang diberikan. Data primer beban pada masing-masing turbin gas dengan tingkat penggunaan bahan bakar gas pada bulan Maret 2010 dapat dilihat pada tabel 4.1 sampai 4.3 dibawah ini.

Tabel 4.1. Penggunaan Bahan Bakar Gas pada Turbin Gas 1

No	Active Power (MW)	Fuel Gas Flow (kg/s)	Fuel Gas Flow (MMSCF/h)	Energy (MMBTU/h)	Energy (MMBTU/KWh)
1	70.01999664	5.71999979	0.896122104	1012.617978	0.01446184
2	75.54000092	5.849999905	0.916488534	1035.632044	0.013709717
3	80.98000336	6.03000021	0.94468823	1067.497699	0.013182238
4	87.05999756	6.46999979	1.013620636	1145.391319	0.013156344
5	90.01999664	6.369999886	0.99795418	1127.688223	0.012527086
6	95.75	6.639999866	1.040253648	1175.486623	0.012276623
7	99.91000366	6.78000021	1.062186762	1200.271041	0.012013522
8	104.9400024	7.039999962	1.102919547	1246.299088	0.011876301
9	105.0599976	7.059999943	1.106052838	1249.839707	0.011896438
10	110	7.440000057	1.165585446	1317.111554	0.011973741
11	114.9100037	7.550000191	1.182818585	1336.585001	0.011631581
12	119.8199997	7.670000076	1.201618332	1357.828715	0.011332238
13	124.6800003	8.010000229	1.254884357	1418.019323	0.01137327
14	129.9400024	8.399999619	1.315983498	1487.061353	0.011444215
15	134.9900055	8.680000305	1.359849724	1536.630188	0.011383289
16	140	8.729999542	1.36768284	1545.481609	0.011039154
17	142.1600037	8.930000305	1.399015901	1580.887969	0.011120483

Tabel 4.2. Penggunaan Bahan Bakar Gas pada Turbin Gas 2

No	Active Power (MW)	Fuel Gas Flow (kg/s)	Fuel Gas Flow (MMSCF/h)	Energy (MMBTU/h)	SFC (MMBTU/KWh)
1	70.06999969	5.920000076	0.927455091	1048.024252	0.014956818
2	75.81999969	6.199999809	0.971321167	1097.592919	0.014476298
3	80.05999756	6.389999866	1.001087471	1131.228842	0.014129764
4	85.69999695	6.460000038	1.012054028	1143.621051	0.01334447
5	91.23000336	6.599999905	1.033987066	1168.405385	0.012807249
6	94.76000214	6.460000038	1.012054028	1143.621051	0.012068605
7	100.1100006	6.760000229	1.05905347	1196.730422	0.011954155
8	105.0299988	6.940000057	1.087253091	1228.595993	0.011697572
9	110.0500031	7.170000076	1.123285977	1269.313154	0.011533967
10	115.0100021	7.460000038	1.168718737	1320.652173	0.011482933
11	120.0100021	7.630000114	1.195351749	1350.747477	0.011255291
12	125.0699997	7.909999847	1.239217826	1400.316144	0.011196259
13	130.0200043	8.210000038	1.286217269	1453.425514	0.011178476
14	135	8.390000343	1.314416964	1485.29117	0.011002157
15	140.1100006	8.699999809	1.362982941	1540.170723	0.010992582
16	144.3600006	8.93999958	1.400582435	1582.658151	0.010963273

Tabel 4.3. Penggunaan Bahan Bakar Gas pada Turbin Gas 3

No	Active Power (MW)	Fuel Gas Flow (kg/s)	Fuel Gas Flow (MMSCF/h)	Energy (MMBTU/h)	SFC (MMBTU/KWh)
1	70.20999908	5.730000019	0.897688787	1014.388329	0.014447918
2	74.90000153	5.940000057	0.930588382	1051.564872	0.014039584
3	79.62000275	6.170000076	0.966621268	1092.282033	0.013718689
4	86.30000305	6.389999866	1.001087471	1131.228842	0.013108097
5	91.41999817	6.480000019	1.015187319	1147.16167	0.012548257
6	95.05000305	6.519999981	1.021453901	1154.242908	0.012143534
7	100.0100021	6.690000057	1.048086914	1184.338213	0.011842198
8	105	6.980000019	1.093519674	1235.677231	0.011768355
9	105.0500031	6.940000057	1.087253091	1228.595993	0.011695345
10	110.1100006	7.210000038	1.12955256	1276.394392	0.011591993
11	115.2099991	7.5	1.174985319	1327.733411	0.011524463
12	120.0800018	7.71999979	1.209451523	1366.68022	0.011381414
13	124.7699966	7.949999809	1.245484409	1407.397382	0.011279934
14	130.1900024	8.260000229	1.294050534	1462.277104	0.011231869
15	134.9499969	8.470000267	1.326950129	1499.453646	0.011111118
16	140.25	8.789999962	1.377082788	1556.103551	0.011095212
17	142.6000061	8.899999619	1.394315853	1575.576913	0.011048926

Data di atas menunjukkan hubungan antara beban yang terjadi dengan konsumsi bahan bakar gas. Satuan energi dalam MMBTU/KWh didapatkan dengan terlebih dulu mengkonversikan satuan awal yang ada, yaitu kg/s. Satuan aliran gas dalam kg/s harus terlebih dahulu dikonversikan ke dalam satuan aliran internasional MMSCF/h (*Million Standard Cubic Feet per hour*). Untuk mengubah kg/s menjadi MMSCF/h harus dicari nilai massa jenis gas dalam satuan kg/ft³. Massa jenis udara dalam keadaan standar adalah 1,204 kg/m³ dengan massa jenis relatif gas 0,674 sehingga didapatkan nilai massa jenis gas dengan mengalikan massa jenis udara dengan massa jenis relatif gas, massa jenis gas = 1,204 kg/m³ x 0,674 = 0,811496 kg/m³. Nilai ini harus diubah ke dalam satuan kg/ft³ dengan mengalikannya dengan faktor konversi 1/35,31467 m³/ft³ = 0,028317 m³/ft³ sehingga nilainya menjadi 0,811496 kg/m³ x 0,028317 m³/ft³ = 0,022979011 kg/ft³. Satuan kg/s dikalikan dengan 3600 dan dibagi dengan nilai (0,022979011 kg/ft³ x 10⁶) sehingga satuannya berubah menjadi MMSCF/h.

Satuan aliran dalam MMSCF/h harus diubah dalam satuan energi MMBTU (*Million British Thermal Unit per hour*). Faktor konversi untuk mengubah satuan MMSCF ke MMBTU adalah 1130 MMBTU/MMSCF. Dari MMBTU/h kita mengubahnya menjadi MMBTU/KWh dengan mengalikan $(\text{MMBTU/h} \times 1000)/\text{MW}$ sehingga satuannya menjadi MMBTU/KWh.

Hubungan antara beban pada tiap turbin gas (MW) dengan energi yang digunakan (MMBTU/KWh) dapat kita lihat hubungannya secara matematis dengan meregresikan kedua nilai tersebut.

- Regresi dua variabel

Regresi nilai beban pada turbin gas (MW) dan tingkat penggunaan bahan bakarnya (MMBTU/KWh) dapat dicari dengan menggunakan perangkat lunak Minitab versi 14.0. Salah satu fasilitas dari Minitab 14.0 adalah *command* untuk dapat mencari regresi dari dua variabel dengan model *linear*, *quadratic*, maupun *cubic*. Parameter yang digunakan untuk menentukan model regresi mana yang lebih tepat adalah dengan menggunakan koefisien R^2 (*R Square*) dari masing-masing model. Semakin besar nilai R^2 , semakin tepat model regresinya.

Hubungan antara kedua variabel ditunjukkan oleh fungsi dibawah ini.

$$y_i = f(x_j) \quad (4.1)$$

$$i = 1, 2, 3$$

$$j = 1, 2, 3$$

dimana,

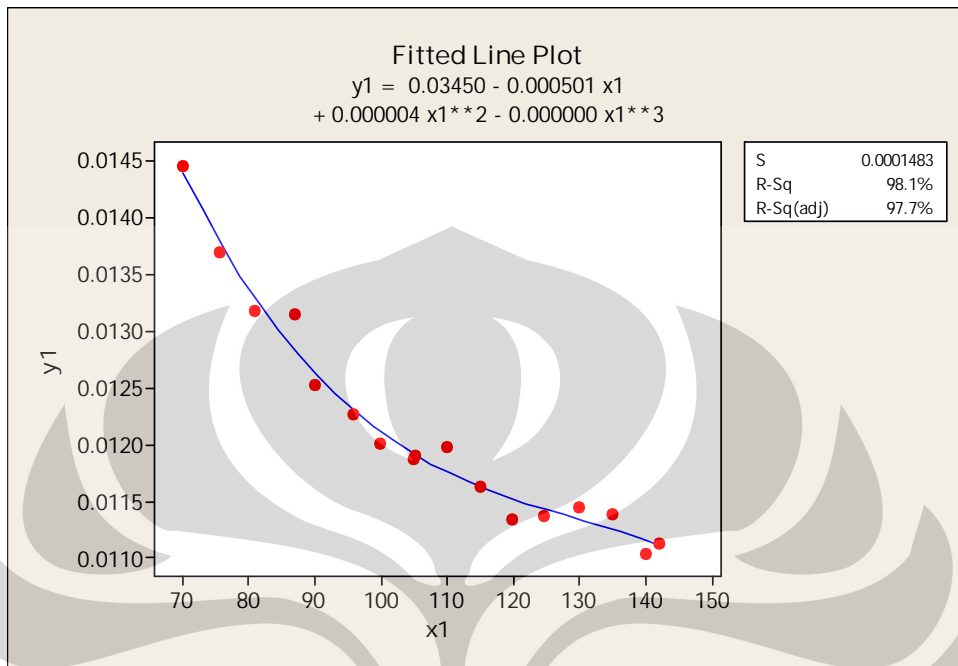
y_i = Tingkat penggunaan bahan bakar gas (MMBTU/KWh) turbin gas ke-i

x_j = Beban pada turbin gas ke-j

Berikut hasil regresi dari ketiga turbin gas berdasarkan data pada tabel 4.1 sampai 4.3.

– Hasil regresi pada turbin gas 1

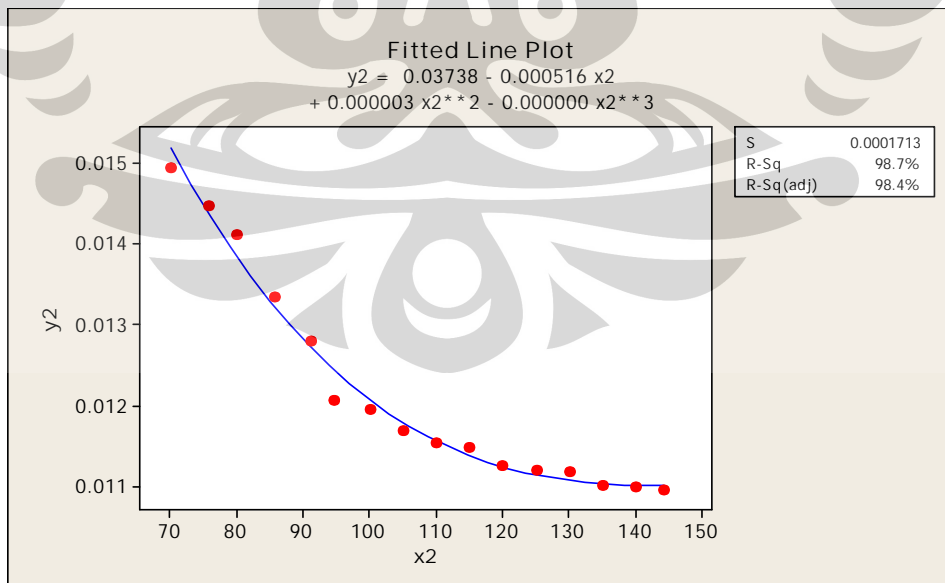
$$y_1 = 0,03450 - 0,000501 x_1 + 0,000004 x_1^2 \quad (4.2)$$



Gambar 4.1. Hasil Regresi pada Turbin Gas 1

– Hasil regresi pada turbin gas 2

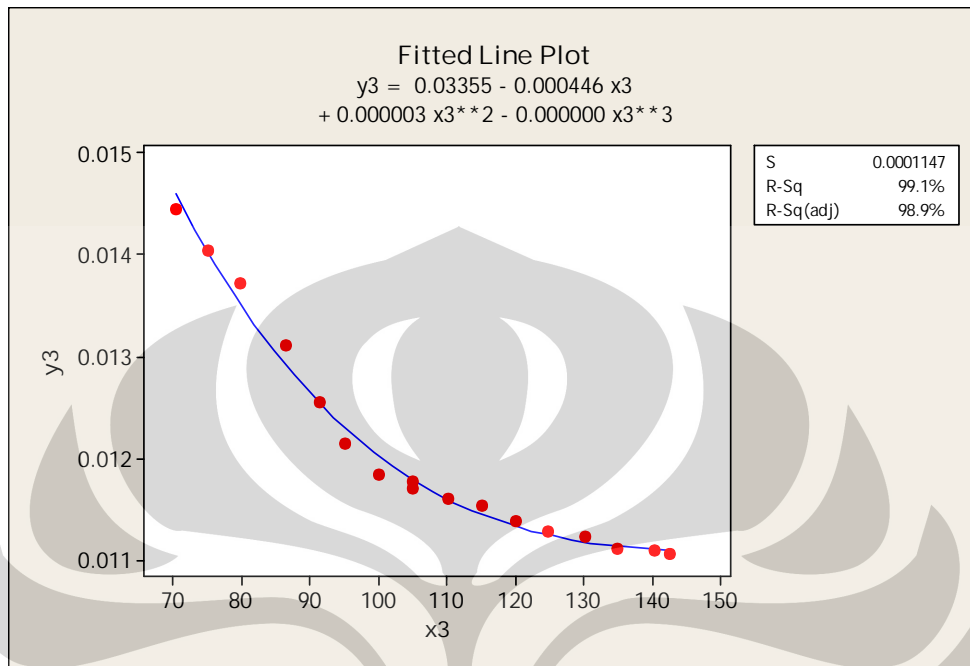
$$y_2 = 0,03738 - 0,000516 x_2 + 0,000003 x_2^2 \quad (4.3)$$



Gambar 4.2. Hasil Regresi pada Turbin Gas 2

– Hasil regresi pada turbin gas 3

$$y_3 = 0,03355 - 0,000446 x_3 + 0,000003 x_3^2 \quad (4.4)$$



Gambar 4.3. Hasil Regresi pada Turbin Gas 3

Seperti disebutkan di atas bahwa *objective function* dari masalah ini adalah meminimalkan penggunaan bahan bakar gas yang digunakan sehingga *objective function* nya menjadi:

$$\text{Minimal } Z = \sum_{i=1}^3 y_i \quad (4.5)$$

atau

$$\text{Minimal } Z = (0,03450 - 0,000501 x_1 + 0,000004 x_1^2) + (0,03738 - 0,000516 x_2 + 0,000003 x_2^2) + (0,03355 - 0,000446 x_3 + 0,000003 x_3^2) \quad (4.6)$$

Fungsi di atas merupakan fungsi polinomial dengan pangkat 2 sehingga kondisi ini tergolong ke dalam masalah *nonlinear programming*.

2. *Constraints function*

Constraints function adalah fungsi yang memberikan batasan terhadap variabel keputusan, yaitu x_1 , x_2 , dan x_3 . Pada masalah ini terdapat beberapa *constraints function*, sebagai berikut.

- Kapasitas beban pada turbin gas

Pada model yang dibuat ditentukan kapasitas minimal dan maksimal turbin gas 1 sampai 3 untuk beroperasi. Kapasitas minimal diasumsikan pada saat turbin gas sudah beroperasi dengan normal sedangkan kapasitas maksimal didapat dari data historis beban turbin gas

$$\begin{aligned} \text{Kapasitas maksimal} & : x_j \leq 150 \text{ MW} \\ \text{Kapasitas minimal} & : x_j \geq 40 \text{ MW} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$j =$ Beban pada turbin gas ke- j , $j = 1, 2, 3$

- Beban pada turbin uap

Turbin uap digerakkan oleh panas dari turbin gas setelah melalui HRSG. Besarnya beban atau daya yang dibangkitkan pada turbin uap bergantung kepada jumlah beban yang dihasilkan oleh turbin gas 1 sampai 3. Hubungan antara beban pada turbin uap dengan jumlah beban yang dihasilkan dari turbin 1 sampai 3 juga dapat dicari dengan metode regresi dengan nilai R^2 paling besar. Jumlah data yang didapat sebanyak 4345. Data tersebut menunjukkan nilai beban pada tiap-tiap turbin. Data dari beban pada turbin uap dan jumlah beban yang dihasilkan turbin gas 1 sampai 3 pada bulan Maret tahun 2009 dan 2010 dapat dilihat pada tabel 4.4 dibawah ini.

Tabel 4.4. Beban pada Turbin Gas dan Uap

Turbin gas 1 (MW)	Turbin gas 2 (MW)	Turbin gas 3 (MW)	Turbin uap (MW)	Σ Turbin 1-3 (MW)
139.5500031	141.1399994	96.72000122	193.6100006	377.4100037
135.8999939	136.1300049	135.3099976	207.8000031	407.3399963
137.6600037	138.1300049	137.5200043	213.1300049	413.3100128
139.3999939	140.8000031	139.6100006	214.6600037	419.8099976
130.5099945	130.3600006	130.4100037	208.5800018	391.2799988
130.1900024	130.1600037	130.3600006	207.3999939	390.7100067
127.6900024	124.8000031	119.0699997	204.9199982	371.5600052
137.6999969	139.1300049	89.62999725	177.9600067	366.4599991
138.1100006	139.6100006	119.7799988	201.3300018	397.5
137.7400055	139.6300049	139.2899933	209.3899994	416.6600037
137.8699951	139.9100037	139.0599976	211.0800018	416.8399963
138.9900055	140.9299927	139.6900024	211.6000061	419.6100006
138.8099976	140.6399994	139.25	212.4299927	418.6999969
139.0200043	140.5800018	139.1799927	212.5700073	418.7799988
138.7100067	140.8899994	139.6600037	213.2200012	419.2600098
138.8699951	140.9900055	139.8200073	211.6799927	419.6800079
139.1100006	141.0200043	139.8200073	210.9100037	419.9500122
139.0399933	141.0299988	139.9299927	211.0099945	419.9999847
139.4600067	141.2299957	139.9499969	211.1399994	420.6399994
139.4100037	141.3000031	139.9100037	211.1399994	420.6200104
139.6799927	141.5299988	140.4299927	211.2599945	421.6399841
139.75	141.3999939	140.5399933	211.4499969	421.6899872
139.8399963	141.6799927	132.9600067	210.8200073	414.4799957
139.7599945	124.4599991	100.0599976	200.1000061	364.2799911
95.13999939	90.18000031	90.26999664	173.7200012	275.5899963
107.3300018	94.98000336	107.0100021	172.7400055	309.3200073
131.1600037	133.2299957	132.4499969	196.9700012	396.8399963
137.0599976	139.1699982	139.1000061	211.6900024	415.3300018
136.1799927	138.6399994	133.8600006	211.1799927	408.6799927
136.2899933	136.8999939	133.1999969	208.4499969	406.3899841
136.6799927	138.6999969	138.7200012	212.3600006	414.0999908
136.7799988	138.7200012	138.7200012	212.9400024	414.2200012
136.8399963	138.9799957	138.8800049	213.0099945	414.6999969
136.6900024	138.8300018	138.75	212.7400055	414.2700043
136.3000031	138.8999939	138.8399963	212.4799957	414.0399933
136.0500031	138.6600037	138.6399994	212.1699982	413.3500061
136.5700073	138.7799988	138.6999969	212.0800018	414.0500031
136.8399963	138.9499969	138.8000031	211.8099976	414.5899963

Hubungan antara kedua nilai tersebut dapat dinotasikan dengan persamaan sebagai berikut.

$$ST = f(x_t) \quad (4.8)$$

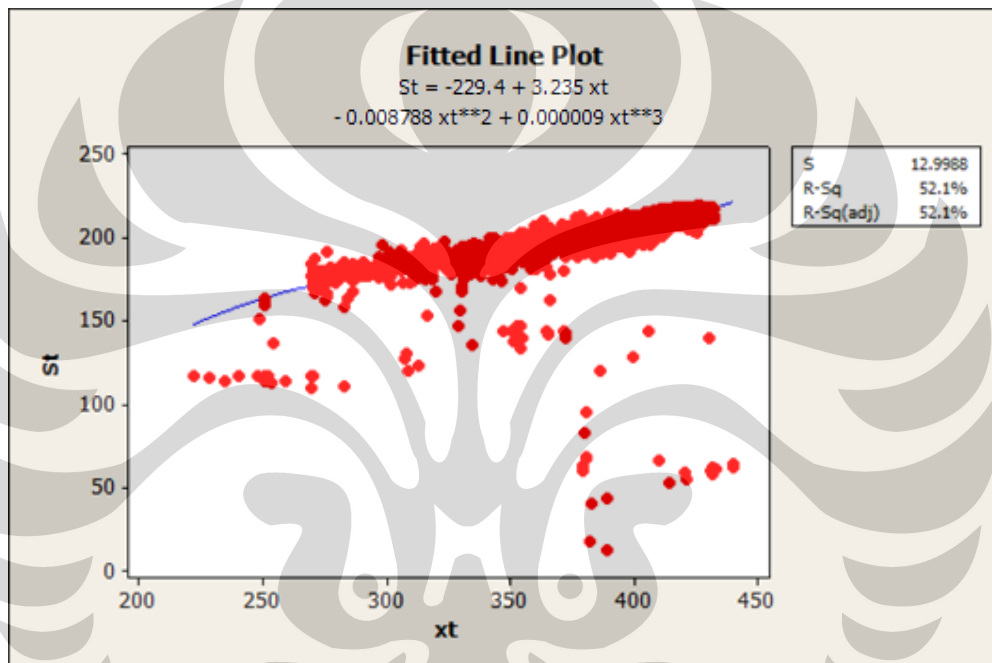
dimana,

ST = Beban pada turbin uap (MW)

x_t = Total beban turbin gas 1 sampai 3

Berikut hasil regresi dari variabel di atas.

$$St = -229.4 + 3,235 x_t - 0,008788 x_t^2 + 0,000009 x_t^3 \quad (4.9)$$



Gambar 4.4. Hasil Regresi pada Turbin Uap

- Total dan perintah produksi

Total listrik yang diproduksi adalah jumlah beban pada turbin gas 1 sampai 3 ditambah dengan beban pada turbin uap.

$$P = \sum_{i=1}^3 x_i + ST \quad (4.10)$$

dan

O P; O 650 MW (didapat dari data historis produksi)

dimana, (4.11)

P = Total produksi listrik untuk *combine cycle* (MW)

O = Perintah produksi (MW)

Dari uraian di atas dapat disimpulkan model matematika untuk kondisi *combine cycle* adalah sebagai berikut.

$$\text{Minimal } Z = \sum_{i=1}^3 y_i$$

dengan

$$y_1 = 0,03450 - 0,000501 x_1 + 0,000004 x_1^2$$

$$y_2 = 0,03738 - 0,000516 x_2 + 0,000003 x_2^2$$

$$y_3 = 0,03355 - 0,000446 x_3 + 0,000003 x_3^2$$

sehingga

$$\text{Minimal } Z = (0,03450 - 0,000501 x_1 + 0,000004 x_1^2) + (0,03738 - 0,000516 x_2 + 0,000003 x_2^2) + (0,03355 - 0,000446 x_3 + 0,000003 x_3^2)$$

subject to

$$x_j \leq 150 \text{ MW}$$

$$x_j \geq 40 \text{ MW}$$

Beban pada turbin uap

$$ST = f(x_t)$$

dengan

$$St = -229,4 + 3,235 x_t - 0,008788 x_t^2 + 0,000009 x_t^3$$

Total produksi

$$P = \sum_{i=1}^3 x_i + ST$$

$$0 \leq P \leq 650 \text{ MW}$$

dimana,

y_i = Tingkat penggunaan bahan bakar gas turbin gas ke-i (MMBTU/KWh)

x_j = Beban pada turbin gas ke-j (MW)

ST = Beban pada turbin uap (MW)

x_t = Total beban turbin gas 1 sampai 3 (MW)

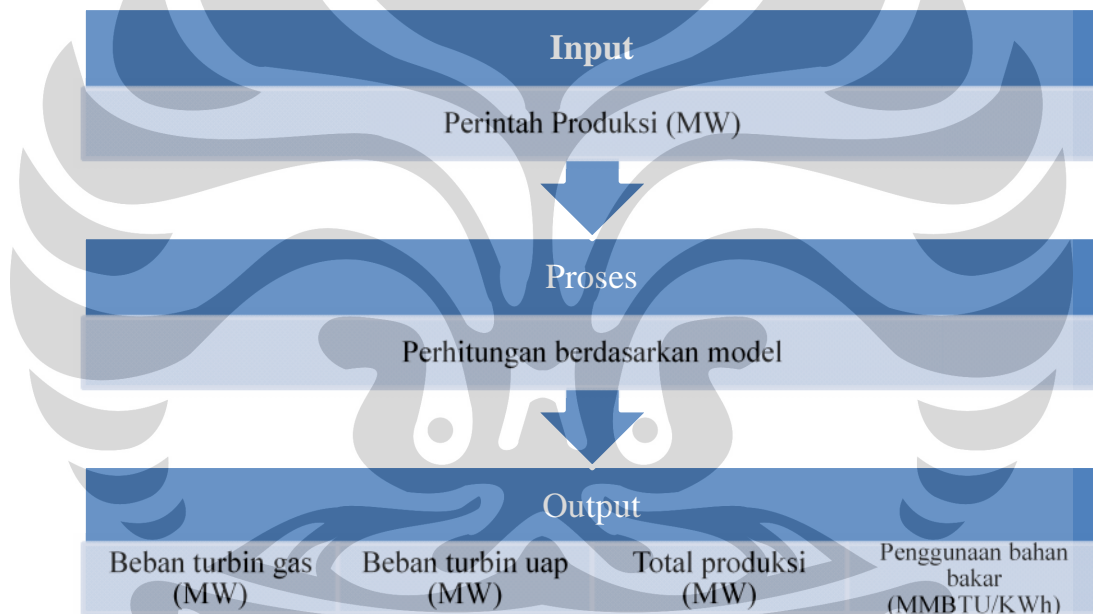
P = Total produksi listrik untuk *combine cycle* (MW)

O = Perintah produksi (MW)

4.1.2 Input Data

Pada bagian ini akan dilakukan input data ke dalam model matematika yang telah dibuat. Data yang diinput ke dalam model matematika adalah data produksi listrik dari. Data historis yang akan digunakan adalah data pada bulan Maret 2010 dengan siklus *combine cycle*. Output dari pengolahan data ini adalah beban pada turbin gas 1 sampai 3, beban pada turbin gas, total produksi listrik, dan tingkat penggunaan bahan bakar gas pada masing-masing turbin gas.

Model matematika yang ada, dimasukan ke dalam *software*. *Software* yang digunakan adalah fasilitas *add-ins Solver* pada Microsoft Excel. Proses pengolahan data pada model matematika yang telah dibuat dapat dilihat pada Gambar 4.5 dibawah ini.



Gambar 4.5. Skema Pengolahan Data

Format yang digunakan untuk mengolah data dibentuk dalam tabel yang dirancang di Microsoft Excel yang sudah berisi formulasi model matematika. Tabel 4.5 dibawah ini memperlihatkan contoh kondisi awal penginputan data, yaitu perintah produksi pada PLTGU sebesar 560 MW.

Tabel 4.5. Input Perintah Produksi

Perintah Produksi	560	MW	Total Produksi		MW
Daya pada Turbin Gas			Penggunaan Bahan Bakar Gas		
Turbin gas 1		MW	Turbin gas 1		MMBTU/KWh
Turbin gas 2		MW	Turbin gas 2		MMBTU/KWh
Turbin gas 3		MW	Turbin gas 3		MMBTU/KWh
Σ Turbin gas		MW	Σ		MMBTU/KWh
Daya pada Turbin Uap			Kapasitas Turbin gas		
Turbin uap		MW	Kapasitas	40 MW 150	MW

Setelah perintah produksi diinput, *Solver* pada Microsoft Excel akan melakukan proses perhitungan untuk mencari nilai beban pada turbin gas dan turbin uap, total produksi, dan tingkat penggunaan bahan bakar gas. Tabel 4.6 dibawah ini memperlihatkan contoh hasil perhitungan optimasi beban turbin gas untuk meminimalkan penggunaan bahan bakar gas untuk perintah produksi sebesar 560 MW.

Tabel 4.6. Output Perhitungan untuk Beban pada Turbin Gas dan Turbin Uap, Total Produksi, serta Tingkat Penggunaan Bahan Bakar

Perintah Produksi	560	MW	Total Produksi	559.9999997	MW
Daya pada Turbin Gas			Penggunaan Bahan Bakar Gas		
Turbin gas 1	96.84201453	MW	Turbin gas 1	0.023495654	MMBTU/KWh
Turbin gas 2	131.6226861	MW	Turbin gas 2	0.021436288	MMBTU/KWh
Turbin gas 3	119.9560227	MW	Turbin gas 3	0.023217956	MMBTU/KWh
Σ Turbin gas	348.4207233	MW	Σ	0.068149898	MMBTU/KWh
Daya pada Turbin Uap			Kapasitas Turbin gas		
Turbin uap	211.5792764	MW	Kapasitas	40 MW 150	MW

4.2 Hasil Pengolahan Data

Pada tahap ini akan dilakukan pengolahan data dengan input perintah produksi pada bulan Maret 2010 dengan kondisi *combine cycle*. Output yang keluar adalah nilai beban pada tiap turbin gas serta tingkat penggunaan bahan bakarnya. Pengolahan data ini akan disimulasikan untuk perhitungan selama 24 jam. Dari data yang ada besarnya perintah produksi tercatat setiap 15 menit sekali sehingga dalam 24 jam ada 96 perintah produksi. Tabel 4.7 menunjukkan contoh hasil pengolahan data berdasarkan model optimasi yang dibuat.

Tabel 4.7. Contoh Hasil Pengolahan Data untuk 20 Perintah Produksi

Perintah produksi (MW)	Hasil Optimasi					
	Daya turbin gas (MW)			Bahan bakar gas (MMBTU/KWh)		
	1	2	3	1	2	3
630.23	110.1405	149.3540	137.6813	0.027843	0.027233	0.029013
628.46	109.8194	148.9259	137.2592	0.027722	0.027071	0.028853
625.23	109.2341	148.1454	136.4787	0.027502	0.026778	0.028560
625.12	109.2141	148.1187	136.4521	0.027495	0.026768	0.028550
626.75	109.5099	148.5132	136.8465	0.027605	0.026916	0.028697
627.49	109.6439	148.6919	137.0253	0.027656	0.026983	0.028765
627.54	109.6530	148.7040	137.0373	0.027659	0.026987	0.028769
628.01	109.7380	148.8174	137.1507	0.027691	0.027030	0.028812
628.08	109.7507	148.8343	137.1676	0.027696	0.027036	0.028818
631.62	110.3900	149.6749	138.0282	0.027938	0.027355	0.029145
630.79	110.2325	149.5228	137.7903	0.027878	0.027297	0.029054
629.8	110.0613	149.2484	137.5818	0.027813	0.027193	0.028975
631.39	110.3379	149.6277	137.9758	0.027919	0.027337	0.029125
631.24	110.3200	149.5989	137.9237	0.027912	0.027326	0.029105
627.95	109.7272	148.8029	137.1363	0.027687	0.027025	0.028806
625.48	109.2795	148.2060	136.5393	0.027519	0.026801	0.028582
626.48	109.4610	148.4479	136.7813	0.027587	0.026891	0.028673
628.09	109.7525	148.8367	137.1700	0.027696	0.027037	0.028819
628.6	109.8447	148.9596	137.2929	0.027731	0.027084	0.028865
629.1	109.9453	149.0760	137.4071	0.027769	0.027128	0.028909

Hasil perhitungan di atas akan dibandingkan dengan kondisi yang terjadi sebenarnya dengan memasukkan nilai beban pada turbin gas ke persamaan $y_i = f(x_j)$ sehingga didapatkan nilai penggunaan bahan bakarnya. Tabel 4.8 di bawah ini menunjukkan perbandingan nilai rata-rata penggunaan bahan bakar gas sebelum

dan sesudah optimasi terjadi dengan waktu kerja selama 24 jam. Perhitungan secara lengkapnya akan ditampilkan di bagian lampiran.

Tabel 4.8. Penggunaan Bahan Bakar Gas Sebelum dan Sesudah Optimasi Selama 24 jam

	Sebelum Optimasi (MMBTU/KWh/day)	Sesudah Optimasi (MMBTU/KWh/day)
Rata-rata Penggunaan bahan bakar gas (MMBTU/KWh/day)	0,031496	0,027837

Dari tabel di atas didapat nilai 0,003659 MMBTU/KWh day sebagai energi yang dapat dihemat selama 1 hari kerja.

4.3 Simulasi Beban

Pada bagian ini akan disimulasikan pembebanan yang tidak merata pada ketiga turbin gas selama bulan Maret 2010 sampai dengan Mei 2010. Skenario dari simulasi ini adalah adanya turbin gas yang tidak beroperasi selama beberapa waktu. Turbin gas 1 mulai beroperasi pada minggu ke 3 Maret, turbin gas 2 mulai beroperasi pada minggu pertama April, dan turbin gas 3 mulai beroperasi pada minggu pertama sampai minggu keempat April. Dengan skenario ini akan dihitung berapa nilai rata-rata penggunaan bahan bakar gasnya. Tabel di bawah ini menggambarkan *timeline* beroperasinya turbin gas 1 sampai 3 pada bulan Maret 2010 sampai dengan Mei 2010.

Tabel 4.9. Skenario Simulasi Beban pada Turbin Gas

Turbin gas	Maret				April				Mei			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1												
2												
3												

Simulasi ini juga menghasilkan penggunaan bahan bakar gas pada semua turbin untuk jangka waktu yang ditentukan. Berikut akan ditampilkan tabel nilai

rata-rata penggunaan bahan bakar gas per harinya berdasarkan skenario waktu yang ditentukan.

Tabel 4.10. Rata-rata Penggunaan Bahan Bakar Gas pada Simulasi Beban

Turbin gas	Maret				April				Mei			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.03276				0.030122				0.033496			
2	0				0.023168				0.021951			
3	0				0.022011				0			
Rata-rata	0.03276				0.02510				0.027723			

4.4 Analisa

Pada bagian ini akan dilakukan analisa terhadap model matematika *nonlinear programming*, hasil pengolahan data berdasarkan model yang dibuat, pengaruh biaya bahan bakar gas terhadap konsumsi biaya bahan bakar gas, serta simulasi beban.

4.4.1 Analisa Model Matematika

4.4.1.1 Fungsi Tingkat Penggunaan Bahan Bakar dengan Beban pada Turbin Gas

Model matematika ini memiliki *objective function* meminimalkan penggunaan bahan bakar dalam satuan energi MMBTU/KWh. Fungsi $y_i = f(x_j)$ menjelaskan hubungan antara tingkat penggunaan bahan bakar dengan beban pada turbin gas.

$$y_1 = 0,03450 - 0,000501 x_1 + 0,000004 x_1^2 \quad (4.12)$$

$$y_2 = 0,03738 - 0,000516 x_2 + 0,000003 x_2^2 \quad (4.13)$$

$$y_3 = 0,03355 - 0,000446 x_3 + 0,000003 x_3^2 \quad (4.14)$$

Pada persamaan di atas, hanya ada satu variabel yang dapat mempengaruhi nilai penggunaan bahan bakar (y_i), yaitu beban yang terjadi pada turbin gas (x_j). Pada kenyataannya, tingkat penggunaan bahan bakar juga dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor lain. Faktor tersebut secara tidak langsung dapat mempengaruhi efisiensi dari pembakaran bahan bakar di turbin gas. Faktor tersebut antara lain, kondisi cuaca dan tingkat korosi pada turbin gas. Faktor tersebut sulit untuk diukur dan dijadikan sebagai parameter. Selain itu faktor-faktor ini sifatnya tidak dapat diprediksi, seperti kondisi cuaca misalnya. Dengan kata lain, fungsi $y_i = f$

(x_j) tidak dapat mengakomodir semua variabel yang terjadi sehingga model ini tidak dapat diterapkan dalam berbagai macam kondisi.

4.4.1.2 Fungsi Beban pada Turbin Uap dengan Total Produksi dari Turbin Gas

Persamaan turbin uap sebagai fungsi dari jumlah beban yang dapat dihasilkan turbin gas 1 sampai 3, $ST = f(x_t)$, menunjukkan hanya variabel total beban pada turbin gas 1 sampai 3 (x_t) yang mempengaruhi besarnya beban pada turbin gas.

$$ST = -229,4 + 3,235 x_t - 0,008788 x_t^2 + 0,000009 x_t^3 \quad (4.15)$$

Pada kenyataannya, faktor kondisi cuaca dan tingkat korosi juga dapat mempengaruhi kinerja dari turbin uap sehingga dapat mempengaruhi listrik yang dihasilkan. Satu hal lagi yang tidak dapat diakomodir oleh persamaan ini yaitu energi uap yang dihasilkan oleh HRSG tidak sama dengan energi yang masuk. Energi panas yang masuk dari hasil pembakaran turbin gas nilainya tentu lebih besar dibanding energi uap yang dihasilkan karena ada sejumlah energi yang hilang ketika melewati proses di HRSG. Kondisi ini juga tidak diperlihatkan dalam fungsi tersebut sehingga timbul asumsi efisiensi energi yang masuk dan keluar HRSG mencapai nilai 100%.

4.4.1.3 Kapasitas Turbin Gas

Batasan kapasitas produksi pada turbin gas nilai diantara 40 MW dan 150 MW. Model ini memberikan konsekuensi bahwa hanya dapat digunakan pada kondisi stabil. Pada kenyataannya, tidak selalu beban yang dihasilkan dalam kondisi normal. Jika ada suatu masalah pada turbin gas, listrik yang dihasilkan nilainya bisa kurang dari 40 MW bahkan dapat mencapai angka nol. Artinya dengan batasan ini, model matematika ini tidak dapat digunakan ketika turbin gas ada dalam kondisi tidak normal.

4.4.2 Analisa Hasil Pengolahan Data

4.4.2.1 Analisa Beban Optimal dan Penggunaan Bahan Bakar

Model matematika yang telah dimasukkan ke dalam *Solver* Microsoft Excel, dapat langsung digunakan untuk menentukan beban yang optimal dengan

penggunaan bahan bakar gas yang paling minimal. Tabel 4.9 dibawah ini menunjukkan nilai hasil perhitungan dari perintah produksi sebesar 600 MW.

Tabel 4.11. Output Perhitungan untuk Beban pada Turbin Gas dan Turbin Uap, Total Produksi, serta Tingkat Penggunaan Bahan Bakar

Perintah Produksi	600	MW	Total Produksi	600.0000004	MW
Daya pada Turbin Gas			Penggunaan Bahan Bakar Gas		
Turbin gas 1	104.5592073	MW	Turbin gas 1	0.025846348	MMBTU/KWh
Turbin gas 2	141.9122832	MW	Turbin gas 2	0.02457055	MMBTU/KWh
Turbin gas 3	130.2456173	MW	Turbin gas 3	0.026352217	MMBTU/KWh
Σ Turbin gas	376.7171078	MW	Σ	0.076769116	MMBTU/KWh
Daya pada Turbin Uap			Kapasitas Turbin gas		
Turbin uap	223.2828926	MW	Kapasitas	40 MW 150	MW

Perintah produksi sebesar 600 MW dipenuhi oleh produksi listrik dari turbin gas dan uap. Berdasarkan model yang dibuat, beban optimal pada masing-masing turbin gas untuk memenuhi 600 MW adalah 104,5592073 untuk turbin gas 1, 141,9122832 untuk turbin gas 2, dan 130,2456173 untuk turbin gas 3. Listrik yang dihasilkan turbin uap sebesar 223,2828926 yang dipengaruhi oleh total listrik yang dihasilkan pada turbin gas. Selain itu, beban optimal yang sudah didapat menghasilkan jumlah penggunaan bahan bakar yang paling minimal, yaitu sebesar 0,076769116 MMBTU/KWh.

Perintah produksi ini dapat dipenuhi oleh semua turbin gas dengan kapasitas dibawah kapasitas maksimal. Artinya, perintah produksi sebesar 600 MW belum mencapai titik maksimal. Perintah produksi maksimal sebesar 650 MW. Namun, ketika nilai ini dimasukkan ke dalam model matematika, beban pada turbin gas juga belum mencapai kapasitas maksimal, yaitu 150 MW. Ketiga turbin gas akan mencapai nilai maksimal ketika perintah produksinya mencapai angka 716,905 MW. Adanya selisih nilai dengan kapasitas maksimal turbin gas di

analisa karena fungsi yang ada tidak memperhitungkan variabel lain yang tidak dapat diprediksi dan sulit untuk diukur.

4.4.2.2 Analisa Sebelum dan Sesudah Optimasi

PLTGU beroperasi selama 24 jam untuk dapat memenuhi kebutuhan listrik. Model matematika ini disimulasikan selama satu hari (24 jam) untuk mendapatkan nilai penggunaan bahan bakar gas (MMBTU/KWh) tiap harinya. Kemudian akan diinput juga beban pada turbin gas pada kondisi sebenarnya ke dalam persamaan $y_i = f(x_j)$ untuk mendapatkan nilai penggunaan bahan bakarnya (MMBTU/KWh) tiap harinya. Kedua nilai ini akan dibandingkan hasilnya mana yang lebih kecil tingkat penggunaan bahan bakarnya.

Tabel 4.12. Selisih Penggunaan Bahan Bakar Gas Sebelum dan Sesudah Optimasi Selama 24 jam

	Sebelum Optimasi MMBTU/KWh/day	Sesudah Optimasi MMBTU/KWh/day	Selisih penggunaan bahan bakar gas MMBTU/KWh day
Rata-rata Penggunaan bahan bakar gas MMBTU/KWh/day	0,031496	0,027837	0,003659

Selisih nilai rata-rata penggunaan bahan bakar gas untuk satu harinya sebesar 0,003659 MMBTU/ KWh hari. Nilai ini merepresentasikan komposisi beban yang sudah optimal pada ketiga turbin gas. *Saving energy* ini menghemat pasokan bahan bakar gas ke tempat pembakaran di turbin gas. *Saving energy* ini sangat berarti sekali karena PLTGU beroperasi selama 24 jam nonstop. Dengan kata lain, model matematika ini berhasil mencari nilai minimal rata-rata penggunaan bahan bakar gas dengan parameter adanya *saving energy* antara sebelum dan sesudah dilakukannya optimasi.

Jika diketahui harga 1 MMBTU bahan bakar gas sebesar 4.18 USD, maka setiap harinya terjadi penghematan sebesar $0,003659 \times 5 = \text{USD } 0.0152948 / \text{KWh}$ hari atau jika di rupiahkan dengan nilai tukar rupiah terhadap dolar sebesar Rp 9.000/USD, maka terjadi penghematan sebesar $\text{USD } 0.0152948 / \text{KWh}$ hari $\times \text{Rp}9.000/\text{USD} = \text{Rp } 137,65 / \text{KWh}$ hari. Rata-Rata produksi blok 1 PLTGU PT

PJB Unit Muara Tawar pada tahun 2009 sebesar 12,3 juta KWh. Jadi dalam 1 hari dapat terjadi penghematan sekitar Rp 137,65 / KWh hari x 12.300.000 KWh = Rp 1.693.144.577 / hari.

Penghematan ini tentu sangat berarti untuk dapat terus menekan biaya konsumsi bahan bakar gas dan menjaga ketersediaan cadangan gas untuk waktu yang lebih lama lagi mengingat jumlah PLTGU yang akan terus bertambah.

4.4.3 Pengaruh Biaya Bahan Bakar Gas Terhadap Konsumsi Biaya Bahan Bakar Gas

Bahan bakar gas di pasaran dijual dalam satuan USD/MMBTU. Nilai ini terus mengalami perubahan sehingga dapat mempengaruhi biaya konsumsi bahan bakar gas. Jika diasumsikan kenaikan bahan bakar gas mencapai 10%-20% dari nilai semula, yaitu USD 4.18 / MMBTU tabel di bawah ini menunjukkan perubahan harga serta biaya yang dapat di hemat dalam satu hari.

Tabel 4.13. Pengaruh Perubahan Biaya Bahan Bakar Gas

% kenaikan	USD/MMBTU	IDR/MMBTU	Saving	
			IDR/KWh	IDR/12,3 jt KWh
0	4.18	37,620	137.65	1,693,095,000
10	4.598	41,382	151.42	1,862,466,000
20	5.116	46,044	168.48	2,072,304,000

Perubahan harga bahan bakar gas tentu mempengaruhi konsumsi biaya bahan bakar gas. Namun, kenaikan ini juga mempengaruhi biaya yang dapat dihemat per harinya. Artinya, kenaikan biaya juga akan diiringi dengan naik biaya yang dapat dihemat.

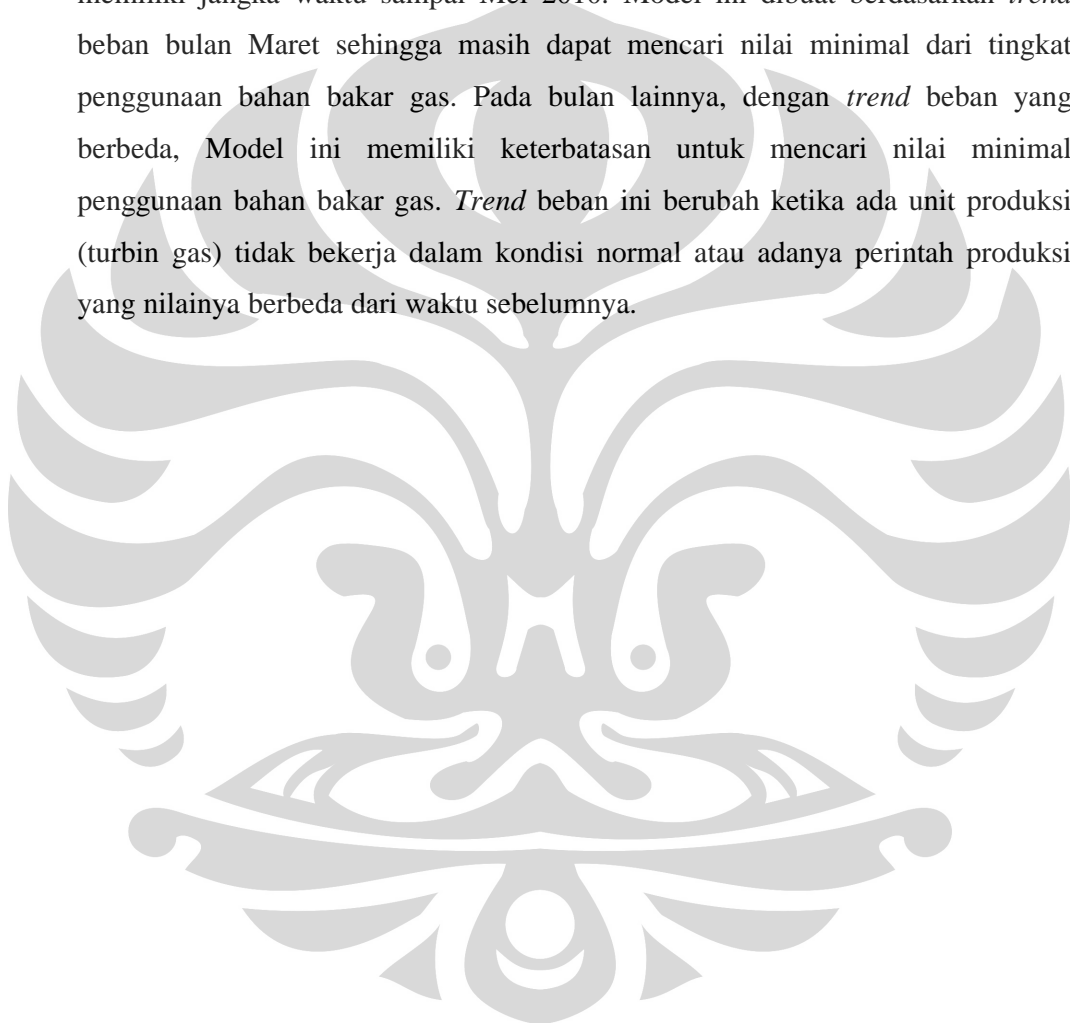
4.4.4 Analisa Simulasi Beban

Simulasi ini dilakukan pada periode Maret sampai Mei 2010. Simulasi ini dilakukan dengan mengasumsikan ada turbin gas yang tidak beroperasi untuk jangka waktu tertentu. Setiap bulannya memiliki rata-rata per hari penggunaan bahan bakar gas. Pada bulan Maret rata-ratanya sebesar 0,03276 MMBTU/KWh hari, bulan April sebesar 0,025100 MMBTU/ KWh hari, dan bulan Mei sebesar 0,027723 MMBTU/KWh hari sedangkan nilai rata-rata penggunaan bahan bakar hasil simulasi perhari berdasarkan model yang dibuat adalah 0,027837

Universitas Indonesia

MMBTU/KWh hari. Berdasarkan nilai tersebut hanya rata-rata di bulan Maret saja yang nilainya lebih besar dibandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan model optimasi sedangkan untuk bulan April dan Mei nilai rata-ratanya lebih kecil dibandingkan dengan hasil perhitungan optimasi.

Hal ini dikarenakan hasil perhitungan berdasarkan model yang dibuat menggunakan data beban pada bulan Maret 2010 sedangkan simulasi beban ini memiliki jangka waktu sampai Mei 2010. Model ini dibuat berdasarkan *trend* beban bulan Maret sehingga masih dapat mencari nilai minimal dari tingkat penggunaan bahan bakar gas. Pada bulan lainnya, dengan *trend* beban yang berbeda, Model ini memiliki keterbatasan untuk mencari nilai minimal penggunaan bahan bakar gas. *Trend* beban ini berubah ketika ada unit produksi (turbin gas) tidak bekerja dalam kondisi normal atau adanya perintah produksi yang nilainya berbeda dari waktu sebelumnya.



BAB 5

KESIMPULAN

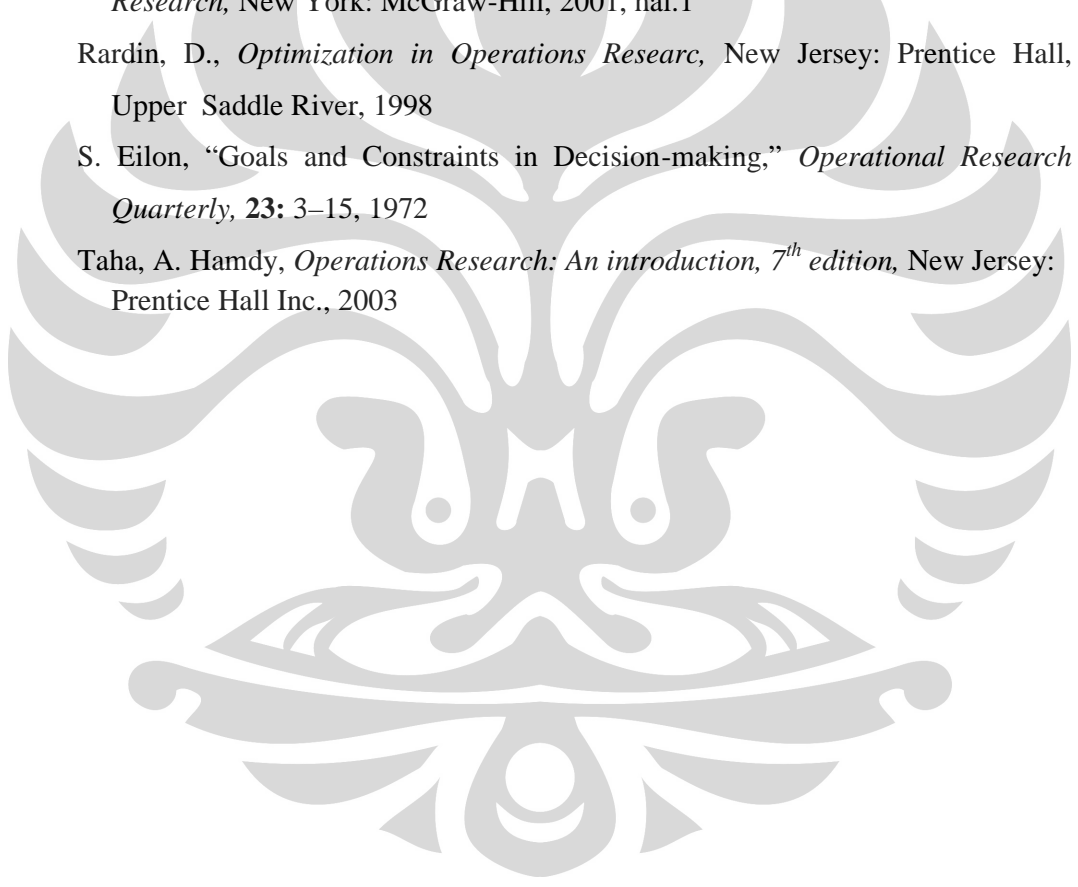
Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Diperoleh model matematika yang bersifat *nonlinear* untuk menentukan beban optimal pada turbin gas guna meminimalkan penggunaan bahan bakar gas untuk siklus produksi *combine cycle*.
2. Penentuan beban pada turbin gas berdasarkan model matematika yang telah dibuat menghasilkan rata-rata penggunaan bahan bakar gas yang lebih kecil dibanding dengan kondisi sebelumnya. Hasil perhitungan setelah dilakukan optimasi dengan menggunakan *Solver* pada Microsoft Excel menghasilkan penghematan biaya bahan bakar gas sebesar Rp 1.693.144.577,- per hari.
3. Pengaruh harga bahan bakar gas sangat signifikan terhadap konsumsi biaya bahan bakar gas. Namun, dengan menggunakan model ini didapat penghematan yang sebanding dengan kenaikan biaya bahan bakar gas.
4. Pada simulasi beban dari bulan Maret 2010 sampai dengan Mei 2010 didapat nilai rata-rata penggunaan bahan bakar gas yang lebih besar hanya pada bulan Maret 2010 dibanding dengan nilai rata-rata hasil optimasi.

Penelitian ini dapat ditindaklanjuti dengan menambahkan pada model kondisi gabungan antara *open* dan *combine cycle*. Selain itu, penelitian tentang optimasi beban turbin gas PLTGU ini dapat dijadikan sebuah acuan untuk dapat terus meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar pada semua jenis pembangkit listrik dengan sedikit perubahan pada model sesuai dengan kondisi pembangkit.

DAFTAR REFERENSI

- Bazaraa, M., H. Sherall, dan C. Shetty, *Nonlinear Programming, Theory and Algorithms*, 2nd edition, New York: Wiley, 1993
- Beightler, C., D. Phillips, dan D. Wilde, *Foundations of Optimization*, 2nd edition, New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River: 1979
- Fiacco, A., dan G. McCormick, *Nonlinear Programming: Sequential Unconstrained Minimization Techniques*, New York: Wiley, 1968
- Frederick S. Hillier dan Gerald J. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, New York: McGraw-Hill, 2001, hal.1
- Rardin, D., *Optimization in Operations Research*, New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 1998
- S. Eilon, "Goals and Constraints in Decision-making," *Operational Research Quarterly*, **23**: 3–15, 1972
- Taha, A. Hamdy, *Operations Research: An introduction*, 7th edition, New Jersey: Prentice Hall Inc., 2003



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Sampel Data Produksi dan Beban pada *Combine Cycle* Bulan Maret 2010

Date	Turbin Gas 1 (MW)	Turbin Gas 2 (MW)	Turbin Gas 3 (MW)	Turbin Uap (MW)	Produksi	Σ Turbin Gas (MW)	jumlah HRSG aktif
3/1/2010 0:00	110.0400009	110.1200027	110.2399979	191.0099945	521.409996	330.4000015	3
3/1/2010 0:15	110.1399994	110.1100006	110.1900024	190.5	520.9400024	330.4400024	3
3/1/2010 0:30	110.1299973	110.1200027	110.1600037	190.4600067	520.8700104	330.4100037	3
3/1/2010 0:45	98.06999969	103.2799988	98.55000305	186.1499939	486.0499954	299.9000015	3
3/1/2010 1:00	90.26000214	90.20999908	90.33000183	176.0099945	446.8099976	270.8000031	3
3/1/2010 1:15	90.22000122	90.27999878	90.26000214	176.1300049	446.890007	270.7600021	3
3/1/2010 1:30	90.26000214	90.22000122	90.27999878	175.8200073	446.5800095	270.7600021	3
3/1/2010 1:45	90.08999634	90.19000244	90.29000092	175.5	446.0699997	270.5699997	3
3/1/2010 2:00	90.45999908	90.20999908	90.30999756	175.3200073	446.3000031	270.9799957	3
3/1/2010 2:15	90.22000122	90.25	90.30999756	175.6999969	446.4799957	270.7799988	3
3/1/2010 2:30	90.20999908	90.23000336	90.22000122	175.5200043	446.1800079	270.6600037	3
3/1/2010 2:45	90.20999908	90.18000031	90.30999756	175.5500031	446.25	270.6999969	3
3/1/2010 3:00	90.33000183	90.15000153	90.30999756	175.4700012	446.2600021	270.7900009	3
3/1/2010 3:15	90.22000122	90.19000244	90.23999786	175.6199951	446.2699966	270.6500015	3
3/1/2010 3:30	90.30000305	90.18000031	90.26000214	175.4499969	446.1900024	270.7400055	3
3/1/2010 3:45	106.7300034	106.4000015	106.2300034	184.0599976	503.4200058	319.3600082	3
3/1/2010 4:00	109.4100037	109.5100021	109.5199966	189.5899963	518.0299988	328.4400024	3
3/1/2010 4:15	109.5299988	109.5599976	109.5599976	189.7799988	518.4299927	328.6499939	3
3/1/2010 4:30	109.5699997	109.5400009	109.5500031	189.8099976	518.4700012	328.6600037	3

(lanjutan)

3/1/2010 4:45	109.8199997	109.6500015	109.6500015	189.7799988	518.9000015	329.1200027	3
3/1/2010 5:00	137.5599976	136.7100067	135.8699951	205.75	615.8899994	410.1399994	3
3/1/2010 5:15	139.1199951	138.2899933	137.9600067	214.8600006	630.2299957	415.3699951	3
3/1/2010 5:30	138.8500061	138.0200043	137.7700043	213.8200073	628.460022	414.6400146	3
3/1/2010 5:45	136.0399933	135.6100006	135.2599945	212.8600006	619.769989	406.9099884	3
3/1/2010 6:00	110.1299973	111.6299973	112.3899994	196.1900024	530.3399963	334.1499939	3
3/1/2010 6:15	100.1999969	100.1500015	100.2099991	183.5599976	484.1199951	300.5599976	3
3/1/2010 6:30	100.1100006	100.1600037	100.1800003	183.5099945	483.9599991	300.4500046	3
3/1/2010 6:45	100.25	100.2099991	100.2399979	183.4400024	484.1399994	300.6999969	3
3/1/2010 7:00	100.2399979	100.2200012	100.1800003	183.3899994	484.0299988	300.6399994	3
3/1/2010 7:15	115.6200027	115.5599976	115.5400009	192.0399933	538.7599945	346.7200012	3
3/1/2010 7:30	109	109.2900009	109.5599976	192.1399994	519.9899979	327.8499985	3
3/1/2010 7:45	90.25	90.33000183	90.43000031	179	450.0100021	271.0100021	3
3/1/2010 8:00	90.30000305	90.20999908	90.26999664	176.6300049	447.4100037	270.7799988	3
3/1/2010 8:15	90.25	90.22000122	90.33999634	176.7899933	447.5999908	270.8099976	3
3/1/2010 8:30	90.26999664	90.23000336	90.26999664	177	447.7699966	270.7699966	3
3/1/2010 8:45	94.72000122	94.84999847	94.97000122	177.8899994	462.4300003	284.5400009	3
3/1/2010 9:00	122.8000031	123.0400009	123.1800003	197.3800049	566.4000092	369.0200043	3
3/1/2010 9:15	132.7799988	132.5599976	131.9100037	210.6999969	607.9499969	397.25	3
3/1/2010 9:30	127.0599976	126.9800034	126.9300003	204.8200073	585.7900085	380.9700012	3
3/1/2010 9:45	129.5800018	129.5500031	129.6499939	208.3300018	597.1100006	388.7799988	3
3/1/2010 10:00	129.6399994	129.5399933	129.6199951	208.5899963	597.3899841	388.7999878	3
3/1/2010 10:15	129.5099945	129.5599976	129.6300049	208.3200073	597.0200043	388.6999969	3

Universitas Indonesia

(lanjutan)

3/1/2010 10:30	135.2899933	134.0899963	133.3699951	212.3200073	615.0699921	402.7499847	3
3/1/2010 10:45	135.1000061	133.4100037	132.8600006	213.6699982	615.0400085	401.3700104	3
3/1/2010 11:00	134.4199982	132.7100067	132.1399994	214	613.2700043	399.2700043	3
3/1/2010 11:15	135.0099945	133.25	132.7299957	212.4299927	613.4199829	400.9899902	3
3/1/2010 11:30	134.6199951	133.6699982	132.9499969	212.7299957	613.969986	401.2399902	3
3/1/2010 11:45	134.4900055	132.6600037	132.0700073	212.2799988	611.5000153	399.2200165	3
3/1/2010 12:00	105.3000031	105.1399994	105.0599976	196.9600067	512.4600067	315.5	3
3/1/2010 12:15	102.3300018	102.8499985	102.6399994	184.0700073	491.8900007	307.8199997	3
3/1/2010 12:30	123.8700027	124.0599976	124.5199966	200.0200043	572.4700012	372.4499969	3
3/1/2010 12:45	129.5899963	129.5200043	129.6199951	207.1699982	595.8999939	388.7299957	3
3/1/2010 13:00	134.2700043	133.6699982	133.6799927	209.0800018	610.6999969	401.6199951	3
3/1/2010 13:15	136.4900055	135.8099976	135.7299957	212.8500061	620.8800049	408.0299988	3
3/1/2010 13:30	136.8000031	136.1000061	135.9400024	213.1399994	621.980011	408.8400116	3
3/1/2010 13:45	123.3099976	123.0599976	122.8399963	204.7100067	573.9199982	369.2099915	3
3/1/2010 14:00	120.2699966	120.2399979	120.2799988	199.2100067	560	360.7899933	3
3/1/2010 14:15	120.3799973	120.1900024	120.2399979	199.1499939	559.9599915	360.8099976	3
3/1/2010 14:30	120.2900009	120.2099991	120.3099976	198.3500061	559.1600037	360.8099976	3
3/1/2010 14:45	107.5199966	106.6600037	112.75	187.8300018	514.7600021	326.9300003	3
3/1/2010 15:00	127.8899994	127.7799988	127.4400024	202.1999969	585.3099976	383.1100006	3
3/1/2010 15:15	125.0899963	124.7399979	124.5999985	199.2100067	573.6399994	374.4299927	3
3/1/2010 15:30	138.8500061	137.5299988	137.0200043	211.8300018	625.230011	413.4000092	3
3/1/2010 15:45	138.1999969	137.1100006	137.1499939	212.6600037	625.1199951	412.4599915	3
3/1/2010 16:00	131.2599945	130.9299927	131.0399933	209.6600037	602.8899841	393.2299805	3

Universitas Indonesia

(lanjutan)

3/1/2010 16:15	120.25	120.2399979	120.2799988	199.0099945	559.7799911	360.7699966	3
3/1/2010 16:30	120.3199997	120.1900024	120.25	198.1199951	558.8799973	360.7600021	3
3/1/2010 16:45	120.3399963	120.2300034	120.2600021	197.9499969	558.7799988	360.8300018	3
3/1/2010 17:00	117.5299988	117.4400024	117.5400009	197	549.5100021	352.5100021	3
3/1/2010 17:15	110.25	110.1399994	110.2200012	190.3099976	520.9199982	330.6100006	3
3/1/2010 17:30	113.5699997	113.4100037	113.3700027	190.9900055	531.3400116	340.3500061	3
3/1/2010 17:45	116.0899963	116.0400009	116.1699982	195.0700073	543.3700027	348.2999954	3
3/1/2010 18:00	95.18000031	95.19000244	95.41999817	182.3000031	468.0900004	285.7900009	3
3/1/2010 18:15	115.4300003	115.25	115.0999985	188.4799957	534.2599945	345.7799988	3
3/1/2010 18:30	123.4199982	123.2399979	123.1999969	197.3699951	567.2299881	369.859993	3
3/1/2010 18:45	138.8600006	138.5200043	138.1799927	211.1900024	626.75	415.5599976	3
3/1/2010 19:00	138.6799927	138.1999969	138.0399933	212.5700073	627.4899902	414.9199829	3
3/1/2010 19:15	138.6300049	138.1100006	137.9499969	212.8500061	627.5400085	414.6900024	3
3/1/2010 19:30	138.7799988	138.1699982	138.0599976	213	628.0099945	415.0099945	3
3/1/2010 19:45	138.9100037	138.2899933	138.0299988	212.8500061	628.0800018	415.2299957	3
3/1/2010 20:00	127.7300034	127.6100006	127.7799988	206.9700012	590.0900004	383.1200027	3
3/1/2010 20:15	120.2399979	120.1699982	120.2799988	197.8200073	558.5100021	360.6899948	3
3/1/2010 20:30	120.2699966	120.2099991	120.2300034	197.4299927	558.1399918	360.7099991	3
3/1/2010 20:45	120.3700027	120.2300034	120.2099991	197.3699951	558.1800003	360.8100052	3
3/1/2010 21:00	119.8700027	119.9199982	120.0999985	197.2700043	557.1600037	359.8899994	3
3/1/2010 21:15	110.2699966	110.1399994	110.1999969	191.3800049	521.9899979	330.609993	3
3/1/2010 21:30	92.15000153	91.91999817	92.55000305	179.8500061	456.4700089	276.6200027	3
3/1/2010 21:45	98.29000092	98.13999939	98.11000061	178.3699951	472.909996	294.5400009	3

Universitas Indonesia

(lanjutan)

3/1/2010 22:00	109.4599991	109.5299988	109.5599976	189.0800018	517.6299973	328.5499954	3
3/1/2010 22:15	109.4700012	109.5299988	109.5999985	189.5599976	518.159996	328.5999985	3
3/1/2010 22:30	109.5500031	109.4700012	109.5599976	189.4100037	517.9900055	328.5800018	3
3/1/2010 22:45	109.6100006	109.5100021	109.5800018	189.5800018	518.2800064	328.7000046	3
3/1/2010 23:00	109.4800034	109.5500031	109.5899963	189.8000031	518.4200058	328.6200027	3
3/1/2010 23:15	109.4199982	109.5199966	109.5500031	189.7200012	518.2099991	328.4899979	3
3/1/2010 23:30	114.4800034	114.3000031	114.1999969	191.5500031	534.5300064	342.9800034	3
3/1/2010 23:45	129.5599976	129.5299988	129.6000061	203.2200012	591.9100037	388.6900024	3
3/2/2010 0:00	112.0599976	112.0999985	112.3799973	195.0700073	531.6100006	336.5399933	3
3/2/2010 0:15	110.0999985	110.1100006	110.1699982	190.4100037	520.7900009	330.3799973	3
3/2/2010 0:30	110.0999985	110.1800003	110.1800003	190.7200012	521.1800003	330.4599991	3
3/2/2010 0:45	110.0699997	110.1299973	110.2200012	190.4700012	520.8899994	330.4199982	3
3/2/2010 1:00	110.0699997	110.0400009	110.1399994	190.5	520.75	330.25	3
3/2/2010 1:15	94.88999939	95.01000214	95.26999664	182.7599945	467.9299927	285.1699982	3
3/2/2010 1:30	90.29000092	90.19999695	90.30000305	175.9100037	446.7000046	270.7900009	3
3/2/2010 1:45	90.29000092	90.19999695	90.30999756	175.8399963	446.6399918	270.7999954	3
3/2/2010 2:00	91.19000244	91.06999969	90.87000275	176.0700073	449.2000122	273.1300049	3
3/2/2010 2:15	118.7600021	118.6800003	118.5599976	192.4199982	548.4199982	356	3
3/2/2010 2:30	103.3399963	103.25	103.1500015	188.7799988	498.5199966	309.7399979	3
3/2/2010 2:45	99.65000153	99.56999969	99.59999847	182.8600006	481.6800003	298.8199997	3
3/2/2010 3:00	99.61000061	99.62000275	99.62999725	183.2599945	482.1199951	298.8600006	3
3/2/2010 3:15	99.54000092	99.61000061	99.59999847	183.1999969	481.9499969	298.75	3
3/2/2010 3:30	99.58000183	99.56999969	99.62999725	183.0099945	481.7899933	298.7799988	3

Universitas Indonesia

(lanjutan)

3/2/2010 3:45	99.63999939	99.5	99.62000275	182.8099976	481.5699997	298.7600021	3
3/2/2010 4:00	100.9800034	100.7099991	100.6399994	183.3300018	485.6600037	302.3300018	3
3/2/2010 4:15	138.0200043	137.5	136.8200073	206.6399994	618.980011	412.3400116	3
3/2/2010 4:30	139.7899933	139.1300049	138.5700073	214.1300049	631.6200104	417.4900055	3
3/2/2010 4:45	139.4900055	139.1399994	138.5700073	213.5899963	630.7900085	417.2000122	3
3/2/2010 5:00	138.9400024	138.5500031	138.2799988	214.0299988	629.8000031	415.7700043	3
3/2/2010 5:15	139.8899994	139.1399994	138.6799927	213.6799927	631.3899841	417.7099915	3
3/2/2010 5:30	139.8600006	138.9900055	138.5399933	213.8500061	631.2400055	417.3899994	3
3/2/2010 5:45	104.2799988	104.6200027	104.8600006	195.3200073	509.0800095	313.7600021	3
3/2/2010 6:00	97.97000122	97.68000031	97.44999695	178.75	471.8499985	293.0999985	3
3/2/2010 6:15	119.6500015	119.6100006	119.6500015	196.2799988	555.1900024	358.9100037	3
3/2/2010 6:30	119.5899963	119.6399994	119.6399994	197.4299927	556.2999878	358.8699951	3
3/2/2010 6:45	119.4199982	119.4000015	119.5100021	197.5399933	555.8699951	358.3300018	3
3/2/2010 7:00	105.0800018	105.0999985	105.0400009	188.0399933	503.2599945	315.2200012	3
3/2/2010 7:15	119.7200012	119.6600037	119.6699982	196.9499969	556	359.0500031	3
3/2/2010 7:30	133.1399994	132.8300018	132.5899963	205.8200073	604.3800049	398.5599976	3
3/2/2010 7:45	124.6299973	124.5999985	124.6999969	205.8699951	579.7999878	373.9299927	3
3/2/2010 8:00	131.4600067	131.0399933	130.6600037	205.1499939	598.3099976	393.1600037	3
3/2/2010 8:15	138.3600006	137.8200073	137.7400055	214.0299988	627.9500122	413.9200134	3
3/2/2010 8:30	137.9600067	136.8899994	136.8399963	213.7899933	625.4799957	411.6900024	3
3/2/2010 8:45	137.6999969	136.3899994	136.3600006	213.7299957	624.1799927	410.4499969	3
3/2/2010 9:00	137.1199951	136.25	135.7400055	213.4199982	622.5299988	409.1100006	3
3/2/2010 9:15	136.8899994	135.8200073	135.4499969	213.5399933	621.6999969	408.1600037	3

Universitas Indonesia

(lanjutan)

3/2/2010 9:30	136.2899933	134.6799927	134.5599976	213.5500031	619.0799866	405.5299835	3
3/2/2010 9:45	135.1600037	133.9199982	133.8300018	213.0800018	615.9900055	402.9100037	3
3/2/2010 10:00	135.3300018	134.0200043	133.6799927	213.0399933	616.0699921	403.0299988	3
3/2/2010 10:15	135.4199982	133.4499969	133.1900024	212.8899994	614.9499969	402.0599976	3
3/2/2010 10:30	135.1900024	132.8999939	132.8500061	212.3999939	613.3399963	400.9400024	3
3/2/2010 10:45	134.9199982	132.4900055	132.3899994	212.1199951	611.9199982	399.8000031	3
3/2/2010 11:00	135.0200043	132.8399963	132.4400024	212.2899933	612.5899963	400.3000031	3
3/2/2010 11:15	134.1699982	132.4600067	132.1900024	212.1499939	610.9700012	398.8200073	3
3/2/2010 11:30	134.9400024	132.5899963	132.0599976	211.9499969	611.5399933	399.5899963	3
3/2/2010 11:45	134.7100067	132.4100037	131.9600067	211.9600067	611.0400238	399.0800171	3
3/2/2010 12:00	118.3099976	117.9000015	117.9300003	203.3000031	557.4400024	354.1399994	3
3/2/2010 12:15	110.25	110.2200012	110.1600037	192.8200073	523.4500122	330.6300049	3
3/2/2010 12:30	110.0800018	110.1699982	110.1200027	192.6199951	522.9899979	330.3700027	3
3/2/2010 12:45	129.75	128.4100037	128.6600037	204.1399994	590.9600067	386.8200073	3
3/2/2010 13:00	133.6399994	131.6000061	131.4700012	210.5399933	607.25	396.7100067	3
3/2/2010 13:15	133.5399933	131.6000061	131.4499969	211.9900055	608.5800018	396.5899963	3
3/2/2010 13:30	133.8699951	131.6399994	131.4700012	212.3300018	609.3099976	396.9799957	3
3/2/2010 13:45	133.9100037	131.3099976	131.2299957	211.2299957	607.6799927	396.4499969	3
3/2/2010 14:00	133.3699951	130.8399963	130.7899933	210.4600067	605.4599915	394.9999847	3
3/2/2010 14:15	132.6600037	130.0599976	130.0800018	210.1300049	602.9300079	392.8000031	3
3/2/2010 14:30	133.6300049	130.9600067	130.8200073	210.1300049	605.5400238	395.4100189	3
3/2/2010 14:45	134.1199951	131.5899963	131.3099976	210.6399994	607.6599884	397.019989	3
3/2/2010 15:00	133.0800018	131	130.6799927	210.4299927	605.1899872	394.7599945	3

Universitas Indonesia

(lanjutan)

3/2/2010 15:15	133.1199951	131.4400024	131.1100006	210.4299927	606.0999908	395.6699982	3
3/2/2010 15:30	133.5599976	131.4499969	131.1699982	210.5299988	606.7099915	396.1799927	3
3/2/2010 15:45	133.5500031	131.5200043	131.3099976	210.6199951	607	396.3800049	3
3/2/2010 16:00	133.8600006	131.9799957	131.6600037	210.6100006	608.1100006	397.5	3
3/2/2010 16:15	134.5800018	132.2599945	132.0200043	210.8600006	609.7200012	398.8600006	3
3/2/2010 16:30	134.7100067	132.4199982	132.0099945	210.8099976	609.9499969	399.1399994	3
3/2/2010 16:45	134.9100037	132.6699982	132.3200073	210.8699951	610.7700043	399.9000092	3
3/2/2010 17:00	122.1200027	121.7799988	121.9300003	205.7599945	571.5899963	365.8300018	3
3/2/2010 17:15	90.30999756	90.30000305	90.38999939	179.75	450.75	271	3
3/2/2010 17:30	96.36000061	96.23999786	96.12000275	178.1600037	466.8800049	288.7200012	3
3/2/2010 17:45	109.6699982	109.5199966	109.5599976	189.8200073	518.5699997	328.7499924	3
3/2/2010 18:00	117.0999985	116.75	116.4800034	192.7599945	543.0899963	350.3300018	3
3/2/2010 18:15	136.3899994	135.9799957	135.1600037	210.8300018	618.3600006	407.5299988	3
3/2/2010 18:30	136.5299988	135.4299927	135.1000061	212.0599976	619.1199951	407.0599976	3
3/2/2010 18:45	137	136.0800018	135.5700073	212.3899994	621.0400085	408.6500092	3
3/2/2010 19:00	136.3699951	135.6799927	135.2100067	212.2400055	619.5	407.2599945	3
3/2/2010 19:15	138.6600037	137.7700043	137.3000031	212.75	626.480011	413.730011	3
3/2/2010 19:30	139.3200073	138.1799927	138.0800018	212.5099945	628.0899963	415.5800018	3
3/2/2010 19:45	139.0399933	138.6600037	138.6300049	212.2700043	628.6000061	416.3300018	3
3/2/2010 20:00	139.3699951	138.8500061	138.8500061	212.0299988	629.1000061	417.0700073	3
3/2/2010 20:15	139.2200012	138.7400055	138.8000031	212.3500061	629.1100159	416.7600098	3
3/2/2010 20:30	139.2599945	138.8999939	138.8699951	213	630.0299835	417.0299835	3
3/2/2010 20:45	139.8800049	139.1799927	139.1000061	213.0700073	631.230011	418.1600037	3

Universitas Indonesia

(lanjutan)

3/2/2010 21:00	136.4100037	136.3999939	136.5200043	212.4499969	621.7799988	409.3300018	3
3/2/2010 21:15	120.2900009	120.25	120.2399979	199.3000031	560.0800018	360.7799988	3
3/2/2010 21:30	102.1999969	102.2799988	102.4199982	187.6199951	494.519989	306.8999939	3
3/2/2010 21:45	91.29000092	91.30999756	91.38999939	178.2899933	452.2799911	273.9899979	3
3/2/2010 22:00	96.80999756	96.58000183	96.41000366	177.5	467.3000031	289.8000031	3
3/2/2010 22:15	109.4499969	109.4800034	109.5500031	188.6799927	517.159996	328.4800034	3
3/2/2010 22:30	109.5500031	109.4800034	109.5599976	189.1999969	517.7900009	328.590004	3
3/2/2010 22:45	104.2699966	104.3700027	104.4700012	186.9900055	500.1000061	313.1100006	3
3/2/2010 23:00	100.2200012	100.1800003	100.2699966	182.7599945	483.4299927	300.6699982	3
3/2/2010 23:15	100.1699982	100.2099991	100.1800003	182.8699951	483.4299927	300.5599976	3
3/2/2010 23:30	95.27999878	95.05999756	94.98999786	180.9499969	466.2799911	285.3299942	3
3/2/2010 23:45	90.23000336	90.26000214	90.25	175.5500031	446.2900085	270.7400055	3
3/3/2010 0:00	90.31999969	90.19999695	90.23999786	175.6100006	446.3699951	270.7599945	3
3/3/2010 0:15	106.1200027	105.9800034	105.8700027	183.4600067	501.4300156	317.9700089	3
3/3/2010 0:30	110.9599991	110.6800003	110.5999985	189.4700012	521.7099991	332.2399979	3
3/3/2010 0:45	129.5500031	129.5800018	129.5700073	202.2599945	590.9600067	388.7000122	3
3/3/2010 1:00	117.6600037	117.6900024	117.75	198.5700073	551.6700134	353.1000061	3
3/3/2010 1:15	133.2899933	132.9100037	132.6000061	203.7100067	602.5100098	398.8000031	3
3/3/2010 1:30	139.3200073	138.7200012	138.1100006	213.1300049	629.280014	416.1500092	3
3/3/2010 1:45	130.5099945	129.8699951	129.5	208.9100037	598.7899933	389.8799896	3
3/3/2010 2:00	120.2699966	120.2799988	120.2399979	198.2200012	559.0099945	360.7899933	3
3/3/2010 2:15	120.1600037	120.1900024	120.25	197.9100037	558.5100098	360.6000061	3
3/3/2010 2:30	114.3000031	114.1200027	114.0199966	195.8399963	538.2799988	342.4400024	3

Universitas Indonesia

(lanjutan)

3/3/2010 2:45	100.2699966	100.1999969	100.2200012	183.4700012	484.159996	300.6899948	3
3/3/2010 3:00	100.2600021	100.2099991	100.2799988	182.7100067	483.4600067	300.75	3
3/3/2010 3:15	100.2200012	100.1399994	100.2099991	182.6199951	483.1899948	300.5699997	3
3/3/2010 3:30	98.62000275	98.48000336	98.45999908	182.4700012	478.0300064	295.5600052	3
3/3/2010 3:45	90.30000305	90.23000336	90.26999664	176.6199951	447.4199982	270.8000031	3
3/3/2010 4:00	90.30999756	90.16999817	90.23999786	175.5700073	446.2900009	270.7199936	3
3/3/2010 4:15	90.23000336	90.19000244	90.22000122	175.4799957	446.1200027	270.6400007	3
3/3/2010 4:30	112.4700012	112.8000031	113.1999969	185.5399933	524.0099945	338.4700012	3
3/3/2010 4:45	134.3800049	133.9499969	133.5299988	208.9600067	610.8200073	401.8600006	3
3/3/2010 5:00	127.2300034	126.9800034	126.8499985	201.0500031	582.1100082	381.0600052	3
3/3/2010 5:15	135.9199982	136.1900024	136.0899963	212.1499939	620.3499908	408.1999969	3
3/3/2010 5:30	120.3199997	120.1699982	120.2600021	199.7700043	560.5200043	360.75	3
3/3/2010 5:45	100.3600006	100.5199966	100.6800003	186.6999969	488.2599945	301.5599976	3
3/3/2010 6:00	99.65000153	99.54000092	99.62000275	182.5899963	481.4000015	298.8100052	3
3/3/2010 6:15	99.55000305	99.54000092	99.69999695	182.6499939	481.4399948	298.7900009	3
3/3/2010 6:30	93.08999634	93.16999817	93.26999664	179.8200073	459.3499985	279.5299911	3
3/3/2010 6:45	90.33000183	90.20999908	90.26999664	175.9600067	446.7700043	270.8099976	3
3/3/2010 7:00	107.7900009	107.6200027	107.4800034	185.0099945	507.9000015	322.8900007	3
3/3/2010 7:15	126.8300018	126.2900009	125.8700027	197.9100037	576.9000092	378.9900055	3
3/3/2010 7:30	139	138.2200012	138.0200043	212.8000031	628.0400085	415.2400055	3
3/3/2010 7:45	138.2599945	137.4199982	137.1300049	214.5399933	627.3499908	412.8099976	3
3/3/2010 8:00	137.8899994	136.7799988	136.75	214.5200043	625.9400024	411.4199982	3
3/3/2010 8:15	137.7299957	136.3500061	136.2599945	214.4400024	624.7799988	410.3399963	3

Universitas Indonesia

Lampiran 2. Hasil Perhitungan Sebelum dan Sesudah Optimasi Selama 24 jam

Perintah produksi (MW)	Kondisi Sekarang						Hasil Optimasi					
	Daya turbin gas (MW)			MMBTU/KWh			Daya turbin gas (MW)			MMBTU/KWh		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
630.23	139.12	138.29	137.96	0.042218	0.023395	0.029119	110.1405	149.3540	137.6813	0.027843	0.027233	0.029013
628.46	138.85	138.02	137.77	0.042053	0.023310	0.029046	109.8194	148.9259	137.2592	0.027722	0.027071	0.028853
625.23	138.85	137.53	137.02	0.042053	0.023158	0.028763	109.2341	148.1454	136.4787	0.027502	0.026778	0.028560
625.12	138.2	137.11	137.15	0.041659	0.023029	0.028811	109.2141	148.1187	136.4521	0.027495	0.026768	0.028550
626.75	138.86	138.52	138.18	0.042060	0.023467	0.029203	109.5099	148.5132	136.8465	0.027605	0.026916	0.028697
627.49	138.68	138.2	138.04	0.041950	0.023367	0.029149	109.6439	148.6919	137.0253	0.027656	0.026983	0.028765
627.54	138.63	138.11	137.95	0.041919	0.023338	0.029115	109.6530	148.7040	137.0373	0.027659	0.026987	0.028769
628.01	138.78	138.17	138.06	0.042011	0.023357	0.029157	109.7380	148.8174	137.1507	0.027691	0.027030	0.028812
628.08	138.91	138.29	138.03	0.042090	0.023395	0.029145	109.7507	148.8343	137.1676	0.027696	0.027036	0.028818
631.62	139.79	139.13	138.57	0.042630	0.023660	0.029353	110.3900	149.6749	138.0282	0.027938	0.027355	0.029145
630.79	139.49	139.14	138.57	0.042445	0.023664	0.029353	110.2325	149.5228	137.7903	0.027878	0.027297	0.029054
629.8	138.94	138.55	138.28	0.042108	0.023477	0.029241	110.0613	149.2484	137.5818	0.027813	0.027193	0.028975
631.39	139.89	139.14	138.68	0.042692	0.023664	0.029395	110.3379	149.6277	137.9758	0.027919	0.027337	0.029125
631.24	139.86	138.99	138.54	0.042673	0.023616	0.029341	110.3200	149.5989	137.9237	0.027912	0.027326	0.029105
627.95	138.36	137.82	137.74	0.041756	0.023248	0.029035	109.7272	148.8029	137.1363	0.027687	0.027025	0.028806
625.48	137.96	136.89	136.84	0.041514	0.022961	0.028695	109.2795	148.2060	136.5393	0.027519	0.026801	0.028582
626.48	138.66	137.77	137.3	0.041938	0.023232	0.028868	109.4610	148.4479	136.7813	0.027587	0.026891	0.028673
628.09	139.32	138.18	138.08	0.042341	0.023360	0.029165	109.7525	148.8367	137.1700	0.027696	0.027037	0.028819
628.6	139.04	138.66	138.63	0.042169	0.023511	0.029376	109.8447	148.9596	137.2929	0.027731	0.027084	0.028865

(lanjutan)

629.1	139.37	138.85	138.85	0.042372	0.023571	0.029461	109.9453	149.0760	137.4071	0.027769	0.027128	0.028909
629.11	139.22	138.74	138.8	0.042280	0.023537	0.029442	109.9368	149.0824	137.4158	0.027766	0.027130	0.028912
630.03	139.26	138.9	138.87	0.042304	0.023587	0.029469	110.1028	149.3037	137.6371	0.027829	0.027214	0.028996
631.23	139.88	139.18	139.1	0.042686	0.023676	0.029558	110.3189	149.5919	137.9252	0.027911	0.027324	0.029105
629.28	139.32	138.72	138.11	0.042341	0.023530	0.029176	109.9675	149.1234	137.4567	0.027778	0.027146	0.028927
628.04	139	138.22	138.02	0.042145	0.023373	0.029142	109.7435	148.8246	137.1580	0.027693	0.027033	0.028814
627.35	138.26	137.42	137.13	0.041695	0.023124	0.028804	109.6186	148.6581	136.9915	0.027646	0.026970	0.028752
625.94	137.89	136.78	136.75	0.041472	0.022928	0.028661	109.3630	148.3173	136.6507	0.027550	0.026842	0.028624
625.18	137.69	136.62	136.31	0.041351	0.022879	0.028497	109.2250	148.1333	136.4666	0.027499	0.026774	0.028555
626.65	137.8	136.94	136.9	0.041418	0.022977	0.028717	109.4918	148.4890	136.8224	0.027598	0.026907	0.028688
625.66	137.7	137.69	137.45	0.041357	0.023208	0.028925	109.3122	148.2495	136.5829	0.027531	0.026817	0.028599
626.34	138.68	138.22	137.68	0.041950	0.023373	0.029012	109.4356	148.4141	136.7474	0.027577	0.026879	0.028660
628.13	139.36	138.87	138.63	0.042365	0.023578	0.029376	109.7597	148.8463	137.1797	0.027699	0.027041	0.028823
628.15	139.11	138.53	138.37	0.042212	0.023470	0.029276	109.7634	148.8511	137.1845	0.027701	0.027043	0.028824
628.19	139.11	138.51	138.33	0.042212	0.023464	0.029260	109.7706	148.8608	137.1941	0.027703	0.027046	0.028828
628.92	139.11	138.87	138.63	0.042212	0.023578	0.029376	109.9025	149.0367	137.3700	0.027753	0.027113	0.028895
629.29	139.36	138.91	138.71	0.042365	0.023590	0.029407	109.9693	149.1258	137.4591	0.027778	0.027147	0.028928
629.72	139.61	138.99	138.86	0.042519	0.023616	0.029465	110.0469	149.2292	137.5625	0.027808	0.027186	0.028967
628.88	139.64	139.47	139.07	0.042538	0.023769	0.029546	109.8953	149.0271	137.3604	0.027750	0.027109	0.028891
627.59	138.8	139.58	138.88	0.042023	0.023804	0.029472	109.6621	148.7161	137.0494	0.027662	0.026992	0.028774
628.22	137.88	138.66	138.31	0.041466	0.023511	0.029253	109.7760	148.8680	137.2014	0.027705	0.027049	0.028831

Universitas Indonesia

(lanjutan)

628.62	138.29	139.14	138.57	0.041713	0.023664	0.029353	109.8483	148.9644	137.2978	0.027733	0.027086	0.028867
628.47	138.41	139.48	138.75	0.041786	0.023772	0.029422	109.8212	148.9283	137.2616	0.027722	0.027072	0.028854
630.26	139.1	139.51	139.02	0.042206	0.023782	0.029527	110.1442	149.3590	137.6923	0.027845	0.027235	0.029017
625.39	137.31	137.61	137.35	0.041124	0.023183	0.028887	109.2631	148.1842	136.5175	0.027513	0.026793	0.028574
628.11	139.31	139.45	138.73	0.042335	0.023763	0.029414	109.7561	148.8415	137.1748	0.027698	0.027039	0.028821
630.63	139	139.09	138.41	0.042145	0.023648	0.029291	110.2154	149.4344	137.7901	0.027872	0.027264	0.029054
630.96	139.24	139.03	138.48	0.042292	0.023629	0.029318	110.2703	149.5271	137.8604	0.027893	0.027299	0.029081
628.68	138.75	138.89	138.28	0.041993	0.023584	0.029241	109.8492	148.9791	137.3219	0.027733	0.027091	0.028876
628.21	138.38	138.91	138.25	0.041768	0.023590	0.029230	109.7742	148.8656	137.1990	0.027705	0.027048	0.028830
628.03	138.19	138.97	138.17	0.041653	0.023609	0.029199	109.7417	148.8222	137.1556	0.027692	0.027032	0.028814
627.65	138.2	138.81	137.85	0.041659	0.023559	0.029077	109.6729	148.7305	137.0639	0.027666	0.026997	0.028779
627.62	138.17	138.83	137.83	0.041641	0.023565	0.029069	109.6675	148.7233	137.0566	0.027664	0.026995	0.028776
628.04	138.17	139	138.1	0.041641	0.023619	0.029172	109.7436	148.8184	137.1640	0.027693	0.027030	0.028817
626.85	137.59	138.73	137.94	0.041291	0.023533	0.029111	109.5218	148.5508	136.8635	0.027610	0.026930	0.028704
626.81	137.6	138.74	137.89	0.041297	0.023537	0.029092	109.5208	148.5277	136.8610	0.027609	0.026921	0.028703
627.32	137.84	138.68	137.91	0.041442	0.023518	0.029100	109.6132	148.6509	136.9842	0.027644	0.026967	0.028749
628.3	138.69	138.87	138.26	0.041956	0.023578	0.029234	109.7905	148.8873	137.2206	0.027711	0.027056	0.028838
628.49	138.19	138.32	137.94	0.041653	0.023404	0.029111	109.8248	148.9331	137.2664	0.027724	0.027074	0.028855
628.33	138.32	138.47	137.76	0.041731	0.023451	0.029042	109.7959	148.8945	137.2279	0.027713	0.027059	0.028841
628.6	138.27	138.67	137.85	0.041701	0.023514	0.029077	109.8447	148.9596	137.2930	0.027731	0.027084	0.028865
628.47	137.93	138.77	137.99	0.041496	0.023546	0.029130	109.8212	148.9283	137.2616	0.027722	0.027072	0.028854

Universitas Indonesia

(lanjutan)

628.35	137.99	138.7	137.99	0.041532	0.023524	0.029130	109.7995	148.8994	137.2327	0.027714	0.027061	0.028843
629.33	138.28	139.06	138.34	0.041707	0.023638	0.029264	109.9765	149.1354	137.4687	0.027781	0.027150	0.028932
628.86	138.24	138.88	138.22	0.041683	0.023581	0.029218	109.9001	149.0499	137.3196	0.027752	0.027118	0.028875
629.01	138.11	138.94	138.33	0.041604	0.023600	0.029260	109.9188	149.0584	137.3917	0.027759	0.027121	0.028903
629.34	138.09	139.04	138.48	0.041592	0.023632	0.029318	109.9783	149.1378	137.4711	0.027782	0.027151	0.028933
629.17	138.02	138.98	138.39	0.041550	0.023613	0.029283	109.9477	149.0969	137.4302	0.027770	0.027136	0.028917
629.87	138.74	138.97	138.33	0.041986	0.023609	0.029260	110.0739	149.2653	137.5986	0.027818	0.027199	0.028981
629.96	138.72	139.04	138.41	0.041974	0.023632	0.029291	110.0902	149.2869	137.6202	0.027824	0.027208	0.028989
628.77	138.33	139.15	138.28	0.041737	0.023667	0.029241	109.8754	149.0006	137.3339	0.027743	0.027099	0.028881
628.85	137.49	139.85	138.71	0.041232	0.023891	0.029407	109.8899	149.0198	137.3532	0.027748	0.027106	0.028888
629.58	137.62	139.71	138.62	0.041309	0.023846	0.029372	110.0216	149.1955	137.5289	0.027798	0.027173	0.028955
627.61	137.36	138.66	137.88	0.041154	0.023511	0.029088	109.6657	148.7209	137.0542	0.027664	0.026994	0.028775
625.07	138.14	137.58	137.1	0.041622	0.023173	0.028793	109.2050	148.1066	136.4400	0.027491	0.026764	0.028545
626.34	137.97	137.84	137.52	0.041520	0.023254	0.028951	109.3872	148.4102	136.7997	0.027559	0.026877	0.028680
628.01	138	138.16	137.65	0.041538	0.023354	0.029001	109.7380	148.8174	137.1507	0.027691	0.027030	0.028812
627.54	138.39	138.4	138.04	0.041774	0.023429	0.029149	109.6530	148.7040	137.0373	0.027659	0.026987	0.028769
628.22	138.27	138.36	138.26	0.041701	0.023417	0.029234	109.7760	148.8680	137.2014	0.027705	0.027049	0.028831
627.16	138.32	138.35	138.29	0.041731	0.023414	0.029245	109.5842	148.6123	136.9456	0.027633	0.026953	0.028735
627.92	139.04	138.52	138.22	0.042169	0.023467	0.029218	109.7218	148.7957	137.1290	0.027685	0.027022	0.028804
628.04	139.13	138.71	138.16	0.042225	0.023527	0.029195	109.7435	148.8246	137.1580	0.027693	0.027033	0.028814
626.64	138.35	138.18	138.1	0.041750	0.023360	0.029172	109.4900	148.4866	136.8200	0.027598	0.026906	0.028687

Universitas Indonesia

(lanjutan)

626.15	138.61	138	137.81	0.041907	0.023304	0.029062	109.4011	148.3681	136.7015	0.027564	0.026861	0.028643
625.4	138.24	137.76	137.73	0.041683	0.023229	0.029031	109.2649	148.1866	136.5199	0.027514	0.026794	0.028575
626.48	138.66	137.92	137.99	0.041938	0.023279	0.029130	109.4610	148.4479	136.7813	0.027587	0.026891	0.028673
625.61	138.18	137.79	137.76	0.041647	0.023239	0.029042	109.3031	148.2374	136.5708	0.027528	0.026812	0.028594
625.37	138.35	137.75	137.64	0.041750	0.023226	0.028997	109.2595	148.1793	136.5127	0.027512	0.026791	0.028572
627.52	138.62	137.67	137.61	0.041913	0.023201	0.028985	109.6494	148.6992	137.0325	0.027658	0.026986	0.028767
626.5	138.64	137.58	137.13	0.041926	0.023173	0.028804	109.4646	148.4528	136.7861	0.027588	0.026893	0.028675
625.49	138.46	137.56	137.56	0.041816	0.023167	0.028966	109.2813	148.2084	136.5417	0.027520	0.026802	0.028583
625.07	138.26	137.47	137.51	0.041695	0.023139	0.028948	109.2050	148.1066	136.4400	0.027491	0.026764	0.028545
625.6	138.64	137.51	137.55	0.041926	0.023152	0.028963	109.3013	148.2350	136.5684	0.027527	0.026812	0.028593
625.33	138.38	137.59	137.62	0.041768	0.023177	0.028989	109.2522	148.1696	136.5030	0.027509	0.026787	0.028569
625.06	138.72	137.5	137.24	0.041974	0.023149	0.028845	109.2067	148.1089	136.4294	0.027492	0.026765	0.028541
625.52	138.75	137.66	137.41	0.041993	0.023198	0.028910	109.2867	148.2156	136.5490	0.027522	0.026804	0.028586
628.04	139.36	138.65	138.02	0.042365	0.023508	0.029142	109.7435	148.8246	137.1580	0.027693	0.027033	0.028814
Rata-rata efisiensi (MMBTU/KWh)				0.031496			Rata-rata efisiensi (MMBTU/KWh)			0.027837		
Biaya BBG (IDR/KWh)				IDR 1,184.87			Biaya BBG (IDR/KWh)			IDR 1,047.22		
Biaya untuk produksi 1 hari (12.3 jt KWh)				IDR 14,573,916,023			Biaya untuk produksi 1 hari (12.3 jt KWh)			IDR 12,880,771,446		

