OPTIMISASI DAYA AKTIF PLTU 2 SULAWESI UTARA (AMURANG) MEMPERTIMBANGKAN EMISI

TUGAS AKHIR

Disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk menyelesaikan Program Strata Satu Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

oleh:

NURUL FADILLAH

D041 17 1005

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

OPTIMISASI DAYA AKTIF PLTU 2 SULAWESI UTARA (AMURANG) MEMPERTIMBANGKAN EMISI

Disusun dan diajukan oleh

NURUL FADILLAH

D041 17 1005

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 12 Juli 2021
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,	Pembimbing Pendamping,
Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, MT.	**Ir. H. Gassing, MT.**
Nip. 19601106 198601 2 001	**Nip. 19600720 198702 1 001**

Ketua Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT.
19691026 199412 2 001

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama	: Nurul Fadillah
Nim	: D041171005
Program Studi	: Teknik Elektro

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

OPTIMISASI DAYA AKTIF PLTU 2 SULAWESI UTARA MEMPERTIMBANGKAN EMISI

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 12 Juli 2021

Yang membuat pernyataan,

Nurul Fadillah

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulisan tugas akhir yang berjudul "Optimisasi Daya Aktif PLTU 2 Sulawesi Utara (Amurang) Mempertimbangkan Emisi" dapat terselesaikan dengan baik. Shalawat dan salam senantiasa penulis kirimkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, suri tauladan bagi semua umat manusia.

Tugas akhir ini dibuat sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi dalam penyelesaian studi program sarjana di Depertemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Banyak rintangan yang dihadapi penulis dalam penyusunan tugas akhir ini, namun berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, akhirnya tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih sebesar-besarnya kepada kedua orang tua penulis yang tak henti-hentinya memberikan dukungan moral maupun materil kepada penulis.

Selama penyusunan tugas akhir ini, penulis memperoleh banyak bimbingan, bantuan, masukan dan saran-saran dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu **Dr. Ir. Hj. Sri Mawar, MT.** selaku pembimbing I sekaligus Ketua Laboratorium Riset Mesin-mesin Listrik dan Bapak **Ir. H. Gassing, MT.** selaku pembimbing II yang senantiasa meluangkan waktu, memberikan bimbingan, dorongan, masukan, arahan dan motivasi selama penulis menyusun tugas akhir ini.

Optimization Software:
www.balesio.com

2. Bapak **Dr. Ir. Yustinus Upa Sombalayuk., MT.** dan Bapak **Yusri Syam Akil, ST., MT., Ph.D.** selaku penguji yang telah memberikan saran dan kritik guna perbaikan tugas akhir ini.
3. Ibu **Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT.** dan Bapak **Dr. Ikhlas Kitta, ST., MT.** selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak **Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T** selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Ibu **Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, M.A** selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
6. Seluruh dosen dan pegawai Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala ilmu dan bantuan yang diberikan selama penulis menempuh masa studi.
7. Seluruh pihak PT. PLN (Persero) Unit Induk Pembangkit dan Penyaluran Sulawesi dan PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pengendalian Pembangkit Minahasa yang telah membantu penulis dalam memperoleh data-data penelitan.
8. Saudara dan segenap keluarga tercinta yang telah memberikan dukungan, dorongan dan motivasi yang tak ternilai harganya.
9. Rahmi dan Teman-teman Bubuhan yang senantiasa menemani dan memberikan dukungan penulis dalam proses penyusunan tugas akhir ini.
10. Teman-teman Laboratorium Riset Mesin-Mesin Listrik atas bantuan, saran dan motivasinya.

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

11. Teman-teman **EQUAL17ER 2017** yang senantiasa menemani dan memberikan semangat, motivasi, dan dukungan selama masa studi.
12. Kak Ayu, Kak Surya, Kak Henra dan Kanda-kanda senior yang telah mengarahkan dan membantu selama masa studi.
13. Seluruh pihak yang telah terlibat membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini yang penulis tidak dapat sebutkan satu persatu.

Semoga segala kebaikan yang telah diberikan kepada penulis mendapat balasan dari Allah SWT. Penulis sangat menyadari sepenuhnya bahwa tugas akhir ini masih sangat jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu saran dan kritik penulis sangat harapkan dalam penyempurnaan penulisan ini.

Makassar, 12 Juli 2021

Penulis

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR) ii

PERNYATAAN KEASLIAN iii

KATA PENGANTAR iv

DAFTAR ISI vii

ABSTRAK xi

ABSTRACT xii

DAFTAR GAMBAR xiii

DAFTAR TABEL xiv

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1. Latar Belakang 1

1.2. Rumusan Masalah 2

1.3. Tujuan Penelitian 2

1.4. Manfaat Penelitian 3

1.5. Batasan Masalah 3

1.6. Metode Penelitian 4

1.7. Sistematika Penulisan 4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 6

2.1. Sistem Tenaga Listrik 6

2.2. Pembangkit Tenaga Listrik 7

2.2.1. Pembangkit Tenaga Listrik Uap 8

2.2.2. Komponen-komponen Utama PLTU 9

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

2.2.3. Prinsip Kerja PLTU 10

2.2.3.1. Sistem Bahan Bakar 10

2.2.3.2. Sistem Udara Pembakaran 10

2.2.3.3. Siklus Air-Uap-Air 11

2.2.3.4. Sistem Penyaluran Tenaga Listrik 11

2.3. Operasi Ekonomis Sistem Tenaga Listrik 12

2.3.1. *Equality and Inequality Constraint* 14

2.4. Karakteristik Pembangkit Listrik Tenaga Thermal 15

2.4.1. Fungsi Konsumsi Batubara 16

2.4.2. Fungsi Biaya Bahan Bakar 16

2.5. Emisi Pembangkit Thermal 16

2.5.1. Fungsi Emisi 18

2.6. Metode Iterasi Lambda 19

2.7. SPSS 19

2.8. MATLAB 20

BAB III METODOLOGI PENELITIAN 22

3.1. Judul Penelitian 22

3.2. Lokasi Penelitian 22

3.3. Waktu Penelitian 22

3.4. Alat dan Bahan Penelitian 22

3.5. Teknik Pengambilan Data 23

3.6. Diagram Alir Penelitian 23

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 25

4.1. Gambaran Umum 25

4.2. Data Penelitian 25

4.2.1. Data Kapasitas Pembangkit 26

4.2.2. Data *Input-Output* Pembangkit 26

4.2.3. Data Beban dan Emisi Pembangkit 28

4.2.4. Grafik Data Penelitian 31

4.3. Optimisasi Biaya Bahan Bakar 32

4.3.1. Fungsi Konsumsi Batubara 33

4.3.2. Fungsi Biaya Bahan Bakar 34

4.3.3. Hasil Optimisasi Biaya Bahan Bakar 35

4.4. Optimisasi Emisi 39

4.4.1. Optimisasi Emisi SO_2 40

4.4.1.1. Fungsi Emisi SO_2 41

4.4.1.2. Hasil Optimisasi Emisi SO_2 43

4.4.2. Optimaliasasi Emisi NOx 45

4.4.2.1. Fungsi Emisi NOx 47

4.4.2.2. Hasil Optimisasi Emisi NOx 49

4.5. Optimisasi Biaya Bahan Bakar Mempertimbangkan Emisi 51

4.5.1. Fungsi Biaya Bahan Bakar Mempertimbangkan Emisi 53

4.5.2. Hasil Optimisasi Biaya Bahan Bakar Mempertimbangkan Emisi .. 54

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

4.6. Perbandingan Sebelum dan Setelah dilakukan Optimisasi 57

4.6.1. Perbandingan Tanpa Mempertimbangkan Emisi 57

4.6.2. Perbandingan dengan Mempertimbangkan Emisi 58

BAB V SIMPULAN DAN SARAN 60

5.1. Simpulan 60

5.2. Saran 61

DAFTAR PUSTAKA 62

LAMPIRAN 65

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

ABSTRAK

Indonesia merupakan negara berkembang, dimana pada saat ini pemerintah terus menerus melakukan pembangunan. Dengan ditingkatkannya pembangunan, maka kebutuhan akan daya listrik juga mengalami peningkatan sehingga dibutuhkan suatu usaha untuk mengoptimalkan pembangkit tenaga listrik tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimisasi daya aktif PLTU 2 Sulawesi Utara (Amurang) dengan memperhatikan jumlah emisi yang dihasilkan oleh pembangkit dan menganalisis perbandingan biaya bahan bakar sebelum dilakukan optimisasi dan setelah dilakukan optimisasi. Metode yang digunakan untuk menentukan kombinasi daya aktif dari pembangkit yaitu metode iterasi lambda. Titik optimisasi pembangkit didapatkan dengan mengolah data operasi pembangkit berupa beban puncak dan beban rendah yang harus dipenuhi oleh pembangkit tersebut serta emisi SO_2 dan NOx yang dihasilkan oleh pembangkit. Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan, diperoleh beberapa kombinasi daya aktif untuk menghasilkan biaya operasi yang optimal dengan emisi yang rendah.

Kata Kunci: Daya Aktif, Emisi SO_2 dan NOx, Biaya Operasi, Iterasi Lambda

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

ABSTRACT

Indonesia is a developing country, where governments are continuing to carry out development. With increased development, the need for electricity has also been increased, and an effort is needed to optimize the power generation. The research aims to optimize the power of PLTU 2 Sulawesi Utara (Amurang) by considering the amount of emissions and analyzing the comparison of fuel costs before optimization and after optimization. The method used to determine the combination of active power from the plant is the lambda iteration method. Plant optimization point obtained by processing the plant operating data in the form of the highest and lowest power that generated by the plant, as well as the SO_2 and NOx emissions that generated by the plant. Based on calculations, several active power combinations are obtained to generate optimal operating costs with low emissions.

Keywords: Active Power, SO_2 and NOx Emissions, Operating Costs, Lambda Iteration Method.

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik 6

Gambar 2. 2 Diagram Satu Garis Sistem Tenaga Listrik 7

Gambar 2. 3 Komponen-komponen Utama Pembangkit Listrik Tenaga Uap 9

Gambar 2. 4 Kurva *Input-Output* Pembangkit 15

Gambar 4. 1 Grafik Data Operasional Unit 1 31

Gambar 4. 2 Grafik Data Operasional Unit 2 31

Gambar 4. 3 Diagram Kartesius Fungsi *Input-Output* Pembangkit Unit 1 33

Gambar 4. 4 Diagram Kartesius Fungsi *Input-Output* Pembangkit Unit 2 34

Gambar 4. 5 Diagram Kartesius Fungsi Emisi SO_2 Pembangkit Unit 1 42

Gambar 4. 6 Diagram Kartesius Fungsi Emisi SO_2 Pembangkit Unit 2 42

Gambar 4. 7 Diagram Kartesius Fungsi Emisi NOx Pembangkit Unit 1 48

Gambar 4. 8 Diagram Kartesius Fungsi Emisi NOx Pembangkit Unit 2 48

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Data Kapasitas Pembangkit yang akan Dioptimalkan 26

Tabel 4. 2 Data *Input-Output* Pembangkit yang akan Dioptimalkan 26

Tabel 4. 3 Data Emisi PLTU 2 Sulawesi Utara (Amurang) 29

Tabel 4. 4 Fungsi Karakteristik *Input-Output* Pembangkit 33

Tabel 4. 5 Fungsi Biaya Bahan Bakar Pembangkit 35

Tabel 4. 6 Hasil Optimisasi Biaya Bahan Bakar PLTU (Amurang) 39

Tabel 4. 7 Persamaan Karakteristik Emisi SO_2 41

Tabel 4. 8 Hasil Optimisasi Emisi SO_2 PLTU 2 Sulawesi Utara (Amurang) 45

Tabel 4. 9 Persamaan Karakteristik Emisi Nox 47

Tabel 4. 10 Hasil Optimisasi Emisi Nox PLTU 2 Sulawesi Utara (Amurang) 51

Tabel 4. 11 Fungsi Persamaan Karakteristik Total Emisi 52

Tabel 4. 12 Fungsi Persamaan Karakteristik Total Biaya Operasi 54

Tabel 4. 13 Hasil Optimisasi Biaya Bahan Bakar PLTU Sulawesi Utara (Amurang) Mempertimbangkan Emisi SO_2 Dan Nox 56

Tabel 4. 14 Sebelum Dilakukan Optimisasi 57

Tabel 4. 15 Setelah Optimisasi 57

Tabel 4. 16 Sebelum Dilakukan Optimisasi 58

Tabel 4. 17 Setelah Optimisasi 58

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara berkembang, dimana pada saat ini pemerintah terus menerus melakukan pembangunan. Dengan ditingkatkannya pembangunan di Indonesia maka kebutuhan akan energi listrik juga terus meningkat.

Beberapa usaha yang dapat ditempuh PT. PLN (Persero) sebagai perusahaan listrik negara dalam mengatasi peningkatan kebutuhan energi listrik antara lain pembangunan pembangkit baru, pembelian listrik swasta (*independent power producer*), sistem sewa pembangkit dengan pemerintah daerah atau pengusaha, penggantian pemakaian bahan bakar serta mengoptimalkan efisiensi dan pemeliharaan pembangkit yang sudah ada.

Upaya pemenuhan kebutuhan energi listrik dilakukan dengan cara membangun pembangkit listrik dari berbagai sumber daya alam seperti air, panas bumi, batubara, dan lainnya. Batubara merupakan salah satu alternatif energi primer yang digunakan sebagai bahan baku karena cadangan batubara di Indonesia cukup melimpah. Berdasarkan hasil kajian Badan Geologi Kementerian ESDM per Desember 2019 menunjukkan, total keseluruhan cadangan batubara mencapai 37,6 miliar ton. Oleh karena itu dibangun pembangkit listrik tenaga uap untuk memanfaatkan sumber daya alam yang melimpah.

Pembangkitan energi listrik tenaga uap menggunakan bahan bakar batubara, disamping menghasilkan energi listrik untuk kebutuhan masyarakat, juga menghasilkan keluaran lain berupa emisi gas buang.

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

Emisi gas buang didefinisikan sebagai hasil pembakaran bahan bakar fosil seperti batubara, gas alam dan minyak yang didispersikan ke udara, tergantung pada komposisi bahan bakar serta jenis dan ukuran boiler.

Emisi yang dihasilkan pembangkit listrik tenaga uap berpotensi merusak lingkungan dan dapat menjadi ancaman bagi kesehatan makhluk hidup. Oleh karena itu, perusahaan pembangkit energi listrik yang sebelumnya hanya fokus untuk mengurangi biaya operasi pembangkit seminimal mungkin saat ini juga turut memperhatikan dampak dari emisi tersebut. Oleh karena itu, dibutuhkan proses optimisasi pembangkit energi listrik yang mampu memenuhi kebutuhan beban namun tetap memperhitungkan baik biaya bahan bakar, biaya operasi, maupun emisi yang dihasilkan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mengoptimisasi daya aktif tiap unit pembangkit pada PLTU 2 Sulawesi Utara (Amurang) dengan mempertimbangkan emisi?
2. Bagaimana perbandingan biaya bahan bakar sebelum dilakukan optimisasi dan setelah dilakukan optimisasi?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini, yaitu:

1. Mengoptimisasi daya aktif tiap unit pembangkit PLTU 2 Sulawesi Utara (Amurang) dengan mempertimbangkan emisi.

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

2. Menganalisis perbandingan biaya bahan bakar sebelum dilakukan optimisasi dan setelah dilakukan optimisasi.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini, yaitu:

1. Sebagai bahan masukan bagi PLTU 2 Sulawesi Utara (Amurang) dalam pengoperasian pembangkit yang ekonomis dengan emisi rendah.
2. Biaya bahan bakar dapat diminimalisir dengan cara mencari nilai optimum pada fungsi biaya bahan bakar PLTU.
3. Emisi dapat diminimalisir dengan cara mencari nilai optimum pada fungsi emisi PLTU.

1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini, yaitu:

1. Objek Penelitian adalah PLTU 2 Sulawesi Utara (Amurang).
2. Parameter-parameter yang diperhitungkan adalah daya aktif, konsumsi batubara, biaya bahan bakar, dan kadar emisi pada PLTU.
3. Emisi yang diperhitungkan adalah SO_2 dan NOx.
4. Penelitian ini tidak memperhitungkan *water treatment* dan proses pembakaran batubara.
5. Data yang diambil adalah data operasional pembangkit pada bulan Desember 2020.
6. Tidak memperhitungkan kualitas batubara.
7. Tidak memperhitungkan rugi-rugi daya.

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

8. Metode yang digunakan dalam menyelesaikan permasalahan adalah metode iterasi lambda.

1.6. Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan pada penelitian ini, yaitu:

1. Studi Literatur

   Kajian yang dilakukan oleh penulis atas referensi-referensi yang ada, baik berupa buku, artikel, maupun sumber lain yang berhubungan dengan penelitian.

2. Pengumpulan dan Pengolahan Data

   Peneliti melakukan pengambilan data dan pengolahan data terhadap objek penelitian, yaitu PLTU 2 Sulawesi Utara (Amurang). Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan *software* SPSS dan MATLAB.

3. Analisis Hasil Pengolahan Data dan Perbandingan Data

   Peneliti melakukan analisis dan perbandingan data untuk memperoleh kesimpulan sementara. Selanjutnya kesimpulan sementara ini akan diolah lebih lanjut pada bab hasil.

4. Penarikan Kesimpulan

   Peneliti membuat kesimpulan dari hasil analisis data yang telah dilakukan dengan melihat korelasi antara hasil pengolahan data dan permasalahan yang diteliti.

1.7. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

Pada bab ini berisi uraian tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan teori-teori pendukung materi penelitian yang diambil dari berbagai sumber ilmiah yang digunakan dalam penulisan laporan penelitian ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini membahas tentang metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas tentang data yang diperoleh dan analisis dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini membahas tentang kesimpulan dari hasil penelitian dan saran-saran yang berkaitan dengan penelitian ini.

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

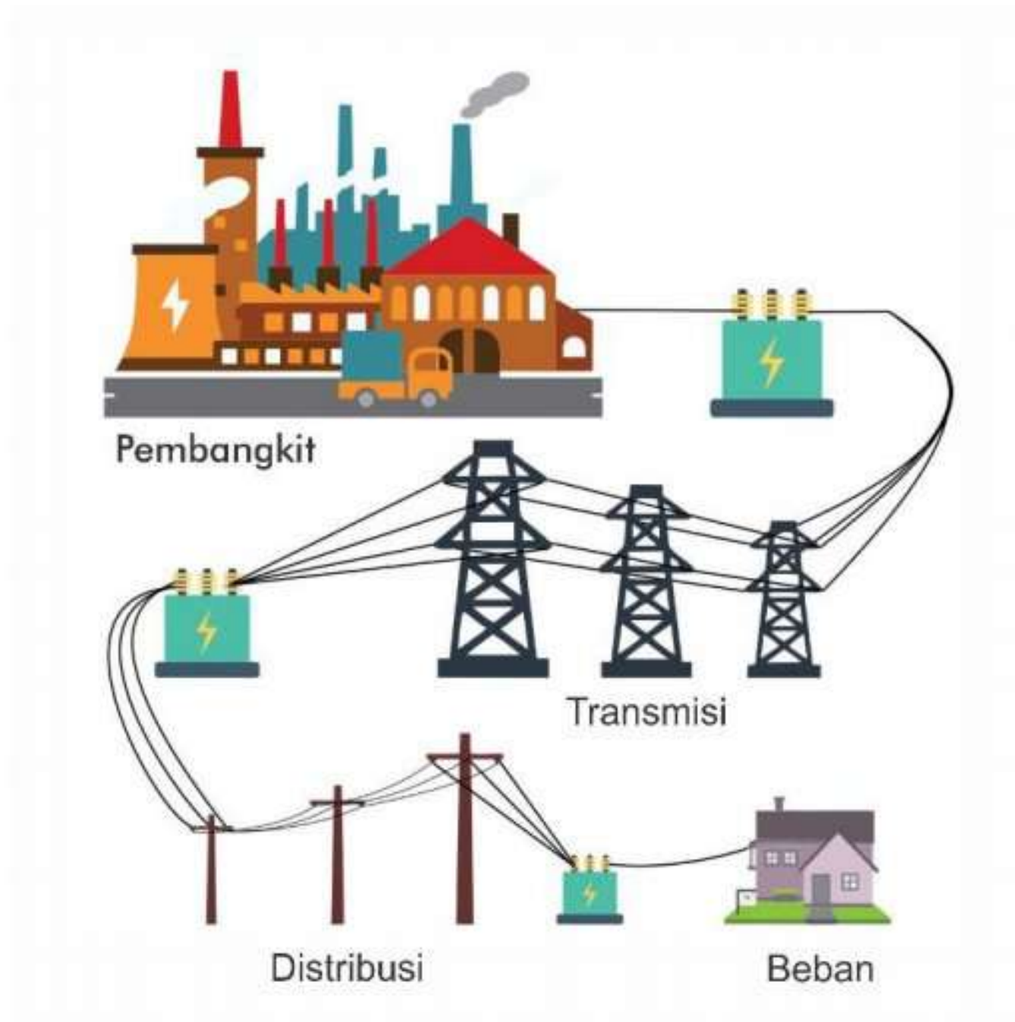
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Tenaga Listrik

Energi listrik sangat penting bagi kehidupan masyarakat dan pembangunan nasional oleh karena itu sistem tenaga listrik tersebut harus aman dan andal. Aman berarti bahwa sistem tenaga listrik tidak membahayakan manusia dan lingkungannya. Andal berarti sistem tenaga listrik dapat melayani pelanggan secara memuaskan. Sistem tersebut dapat dicapai apabila proses perencanaan, pelaksanaan pembangunan, pengoperasian dan pemeliharaan suatu sistem tenaga listrik senantiasa mengikuti ketentuan standar teknik yang berlaku.

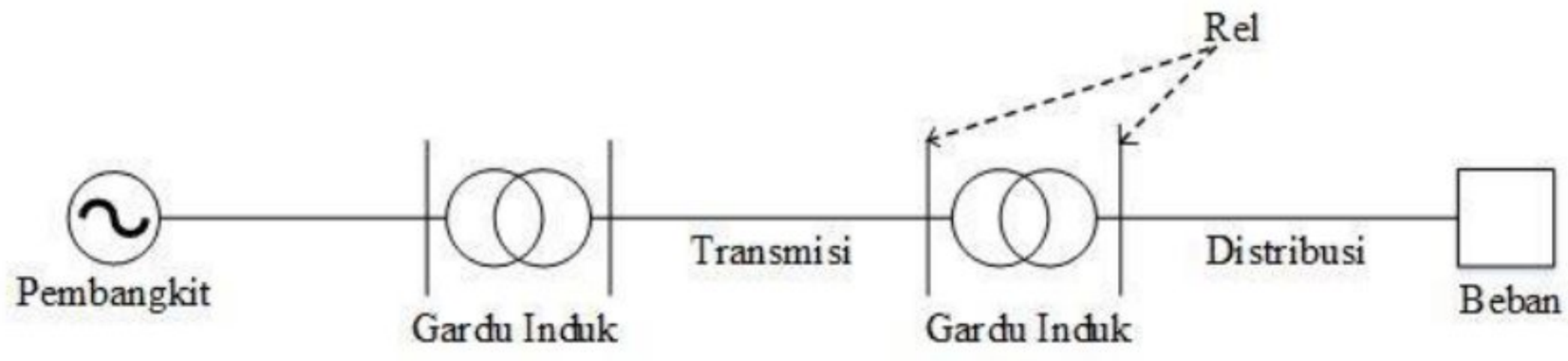
Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang saling berhubungan dan saling bekerja sama untuk melayani kebutuhan energi listrik pelanggan yang terdiri dari beberapa komponen berupa pembangkit, transmisi, distribusi dan beban.



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

Optimization Software:
www.balesio.com

Gambar diatas merupakan skema sistem tenaga listrik. Dapat dilihat pada gambar diatas bagaimana penyaluran energi listrik bisa sampai ke pelanggan. Energi listrik merupakan hasil konversi dari energi mekanik yang dihasilkan oleh pembangkit yang kemudian akan disalurkan melalui saluran transmisi, gardu induk, saluran distribusi hingga ke beban (pelanggan). Berikut gambar diagram satu garis dari sistem tenaga listrik.



Gambar 2. 2 Diagram Satu Garis Sistem Tenaga Listrik

Pada sistem tenaga listrik juga terdapat sebuah sistem yang terhubung satu sama lain atau dikenal sebagai sistem interkoneksi. Sistem ini terdiri dari beberapa pembangkit listrik dan gardu induk yang saling terhubung satu sama lain melalui saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik ke semua gardu induk yang terhubung, sehingga apabila terjadi gangguan pada salah satu pembangkit maka sistem masih mendapatkan suplai dari pembangkit lain yang terhubung atau terinterkoneksi. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa sistem interkoneksi ini dapat membantu dalam menjaga kontinuitas penyediaan energi listrik.

2.2. Pembangkit Tenaga Listrik

Pembangkit tenaga listrik ialah salah satu bagian dari sistem tenaga listrik yang membangkitkan energi listrik dan mengonversikan dari satu bentuk energi menjadi energi listrik. Air, bahan bakar minyak, batubara, angin, dan surya merupakan beberapa contoh sumber energi yang dapat dikonversi menjadi energi

Optimization Software:
www.balesio.com

listrik. Penggolongan pembangkit tenaga listrik biasanya dikelompokkan berdasarkan prinsip kerja dan sumber energi yang digunakan.

Pada proses konversi sumber energi primer baik energi konvensional maupun nonkonvensional menjadi energi listrik dalam pembangkit tenaga listrik menggunakan prinsip kerja yang berbeda-beda yang bergantung pada penggerak mula (*prime mover*) pada pembangkit.

Secara umum, penggolongan pembangkit tenaga listrik dibagi menjadi dua bagian besar, yaitu pembangkit tenaga listrik termal dan pembangkit tenaga listrik non termal. Pembangkit tenaga listrik termal yaitu pembangkit tenaga listrik yang mengonversi energi panas menjadi energi listrik, seperti PLTU, PLTGU, dan PLTG. Sedangkan pembangkit tenaga listrik non termal merupakan pembangkit tenaga listrik yang mengonversi energi yang bukan energi panas menjadi energi listrik, seperti PLTA, PLTS dan PLTB.

2.2.1. Pembangkit Tenaga Listrik Uap

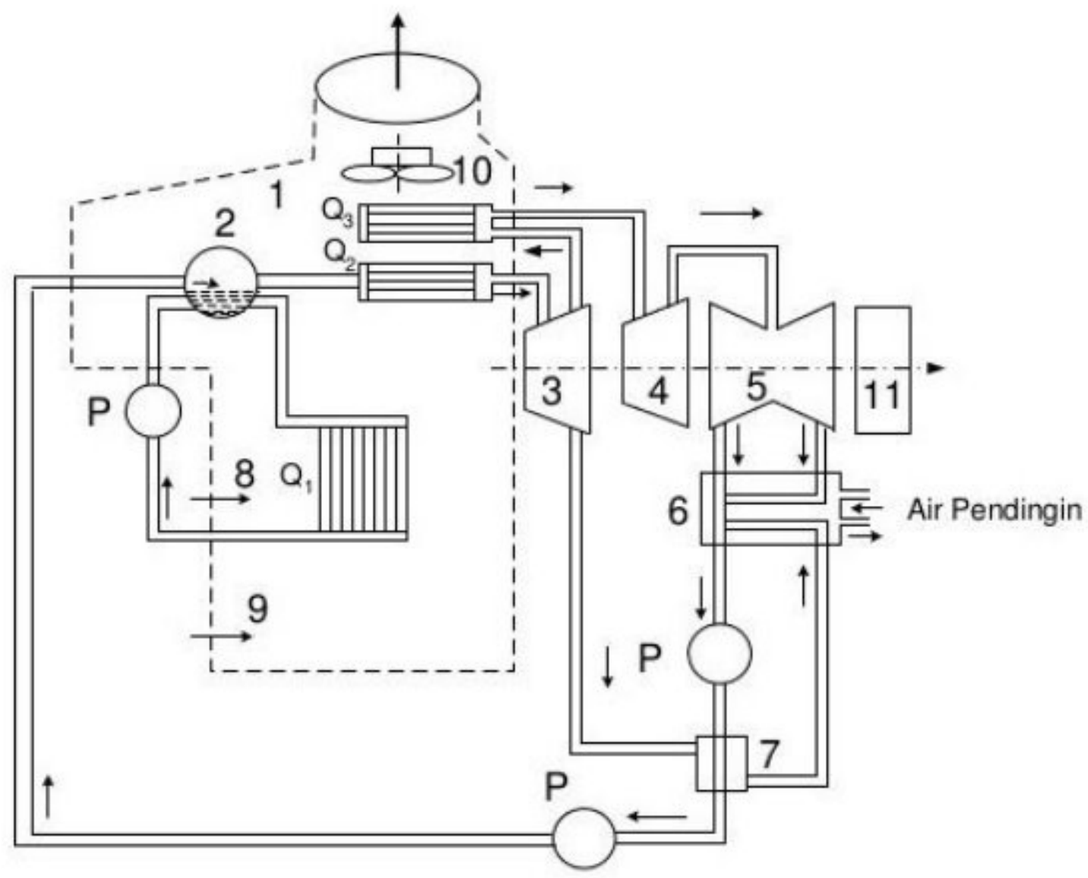
Suatu pembangkit tenaga listrik yang mengonversikan energi kimia menjadi energi listrik dengan menggunakan uap air sebagai fluida kerjanya disebut sebagai pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Pembangkit tersebut memanfaatkan energi kinetik uap untuk menggerakan proses sudu-sudu turbin agar menggerakan poros turbin yang kemudian akan menggerakan generator sehingga terbangkitkan energi listrik, untuk selanjutnya energi listrik tersebut yang akan menyuplai ke beban (Suyitno, 2011).

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

2.2.2. Komponen-komponen Utama PLTU

Pembangkit listrik tenaga uap memiliki beberapa komponen-komponen utama dan struktur dasar yang dapat dilihat pada Gambar II.3. di bawah ini, dimana masing-masing komponen akan bekerja sesuai fungsi dan kegunaannya (Susepto, 2014).



Gambar 2. 3 Komponen-komponen Utama Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Susepto, 2014)

Keterangan gambar:

1. Boiler
2. Drum
3. Turbin Tekanan Tinggi
4. Turbin Tekanan Menengah
5. Turbin Tekanan Rendah
6. Kondensor
7. Pemanasan Awal

Q3 Pemanas Ulang

8. Pembakaran Bahan Bakar
9. Kipas Udara Masuk
10. Kipas Gas Buang
11. Generator

P Pompa

Q1 Pipa-pipa Boiler

Q2 Superhiter

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

2.2.3. Prinsip Kerja PLTU

PLTU menggunakan fluida kerja uap air yang bersirkulasi secara *loop* tertutup. Siklus *loop* tertutup artinya siklus ini menggunakan fluida yang sama secara berulang-ulang. Urutan sirkulasinya secara singkat dijelaskan sebagai berikut:

Pertama, air mengalir ke boiler melalui pipa. Bagian dalam boiler, air dalam pipa dipanaskan oleh gas panas yang dihasilkan dari pembakaran batubara hingga menjadi uap. Kedua, uap yang dihasilkan oleh boiler yang memiliki tekanan dan suhu tertentu diarahkan untuk memutar turbin sehingga menghasilkan daya mekanik berupa putaran. Ketiga, generator yang terhubung langsung dengan turbin berputar menghasilkan energi listrik melalui medan magnet yang berputar pada kumparan (Yuniarti & Prianto, 2010).

2.2.3.1. Sistem Bahan Bakar

Sisa bahan bakar minyak / MFO mengalir dari kapal / tongkang ke ruang pompa dan masuk ke tangki bahan bakar. Dari sini, dipompa kembali dengan pompa bahan bakar, kemudian masuk ke pemanas bahan bakar untuk dikabutkan di dalam pembakar sebagai alat proses pembakaran bahan bakar di dalam boiler (Suyitno, 2011).

2.2.3.2. Sistem Udara Pembakaran

Udara luar dihisap oleh kipas *Forced Draft Fan* dan kemudian gas buang yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar di dalam boiler digunakan untuk mengirimkan gas bekas ke pemanas udara, dan kemudian dibuang ke udara luar melalui cerobong asap (Suyitno, 2011).

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

2.2.3.3. Siklus Air-Uap-Air

Sejumlah air laut dipompa oleh CWP (*Circulating Water Pump*). CWP terutama digunakan sebagai media pendingin di *kondensor* dan sebagian digunakan sebagai air suling di evaporator desalinasi. Setelah air menjadi tawar, air dipompa ke tangki air tambahan oleh pompa distilasi, kemudian ditambahkan ke sistem pemurnian air (*desalinizer*), dan kemudian dimasukkan ke dalam tangki air deionisasi. Air tersebut kemudian dipompa kembali ke *kondensor* dan digabungkan dengan kondensat sebagai air tambahan.

Kondensat yang memenuhi persyaratan *boiler* dipompa kembali oleh pompa kondensat, kemudian masuk ke 2 buah pemanas bertekanan rendah dan dialirkan ke *evaporator*. Untuk melepaskan unsur O_2 yang terkandung di dalam air. Kemudian, air dipompa kembali dengan bantuan *boiler feed pump* dan kemudian dipanaskan kembali di dalam 2 buah pemanas bertekanan tinggi, dan dikirim ke *boiler*, yang terlebih dahulu dipanaskan kembali dengan *economizer* kemudian masuk ke dalam *steam drum*. Proses pemanasan di ruang bakar menghasilkan uap jenuh di dalam *steam drum*. Untuk mendapatkan steam kering dipanaskan kembali oleh *superheater*, kemudian dialirkan dan diputar *steam turbine*. Uap setelah memutar sudu turbin dikondensasikan dengan mendinginkan air laut dengan bantuan *kondensor*, kemudian air yang terkondensasi ditampung di *hot well* (Suyitno, 2011).

2.2.3.4. Sistem Penyaluran Tenaga Listrik

Putaran generator akan menghasilkan energi listrik, melalui penguat/exciter tegangan hingga mencapai 11,5 kV, kemudian melalui trafo utama

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

tegangan dinaikkan menjadi 150 kV. Energi listrik akan disalurkan melalui gardu induk, kemudian dikirim melalui transmisi tegangan tinggi. Setelah melalui *Trafo Step Down*, Gardu Induk menyalurkan energi listrik ke pengguna pada tegangan 220 volt (Suyitno, 2011).

2.3. Operasi Ekonomis Sistem Tenaga Listrik

Sebuah sistem tenaga listrik listrik sangat memerlukan operasi ekonomis untuk mengembalikan modal yang telah diinvestasikan. Jadi selain faktor teknis, faktor ekonomis juga sangat penting dalam pengoperasiannya. Kesetimbangan antara pendapatan dan pengeluaran harus selalu dijaga agar mendapatkan keuntungan yang layak, sehingga penyaluran tenaga listrik dapat dilakukan secara terus menerus.

Pengeluaran (pembiayaan) terbesar dari operasi sistem tenaga listrik digunakan untuk bahan baku energi dengan kisaran pengeluaran sebesar 80% dari total pengeluaran sedangkan besarnya pemakaian bergantung pada beban. Pengeluaran terbesar terletak pada pembangkit sehingga diperlukan pengoperasian pembangkit yang efisien.

Tujuan utama operasi sistem tenaga listrik adalah untuk memenuhi kebutuhan listrik dengan biaya yang minimal, dimana sistem tenaga harus aman, tidak memberikan dampak negatif terhadap lingkungan, dan memiliki keandalan yang memenuhi standar, serta dapat terus menerus memenuhi permintaan. Untuk mencapai tujuan di atas, perlu diatur pembangkit yang efisien atau menggunakan OPF (*Optimal Power Flow*). Dengan OPF akan didapatkan total biaya produksi minimum dari pembangkit (Harun, 2011).

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

Terdapat dua pokok permasalahan yang harus dipecahkan dalam operasi ekonomis pembangkitan pada sistem tenaga listrik yaitu:

- Pengaturan Unit Pembangkit (*Unit Commitment*)

  Pengaturan unit pembangkit merupakan penanganan biaya operasional dari pembangkit tenaga listrik dengan cara mencari kombinasi yang tepat dari unit pembangkit yang ada agar biaya operasional dapat diminimalkan. Skema urutan prioritas dibuat pada pengaturan unit pembangkit, yaitu metode pengoperasian unit pembangkit berdasarkan total biaya rata-rata bahan bakar terendah.

  Pada pengaturan unit ini akan ditentukan unit mana yang akan aktif dan tidak aktif dalam melayani beban sistem selama rentan waktu tertentu. Pengaturan ini akan mempertimbangkan faktor teknis dan faktor ekonomis. Berdasarkan sejumlah pembangkit yang ada akan ditentukan unit mana yang akan beroperasi dan tidak beroperasi pada waktu tertentu sehingga dapat dibuat kombinasi operasi dari tiap unit pembangkit yang ada (Pratama et al., 2016).

- Penjadwalan Ekonomis (*Economic Dispatch*)

  Penjadwalan ekonomis atau *economic dispatch* merupakan upaya untuk menentukan besarnya daya yang harus disediakan oleh setiap unit pembangkit untuk memenuhi suatu beban tertentu dengan membagi beban pada unit pembangkit (Pratama et al., 2016) untuk mencari nilai optimum dari output daya dari hasil kombinasi unit pembangkit yang menghasilkan

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

total biaya pembangkitan paling minimum dan dapat memenuhi batasan *equality* dan *inequality* (Efri, 2013).

2.3.1. *Equality and Inequality Constraint*

Terdapat dua *Constraint* atau batasan dan syarat yang harus dipenuhi untuk masing masing unit agar sistem ini dapat beroperasi. Pertama, daya keluaran setiap unit harus lebih besar atau sama dengan daya minimum dan kurang dari atau sama dengan daya maksimum yang diizinkan saat beroperasi pada masing-masing unit. Kondisi dan *Inequality* tersebut dapat ditunjukkan dalam bentuk rangkaian persamaan sebagai berikut (Wood & Wollenberg, 1996).

$$\frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \qquad \text{N } \textit{equations}$$

$$P_{i,min} \leq Pi \leq P_{i,max} \qquad \text{2N } \textit{inqualities}$$

$$\sum_{i=1}^{n} P_i = P_{load} \qquad \text{1 } \textit{Constraint}$$

Ketika menyadari *inequality constraint*, maka kondisi yang diperlukan dapat diperluas sedikit seperti yang ditunjukkan pada rangkaian persamaan berikut (Wood & Wollenberg, 1996).

$$\frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \qquad \text{for } P_{i,min} < Pi < P_{i,max}$$

$$\frac{dF_i}{dP_i} \leq \lambda \qquad \text{for } P_i = P_{i,max}$$

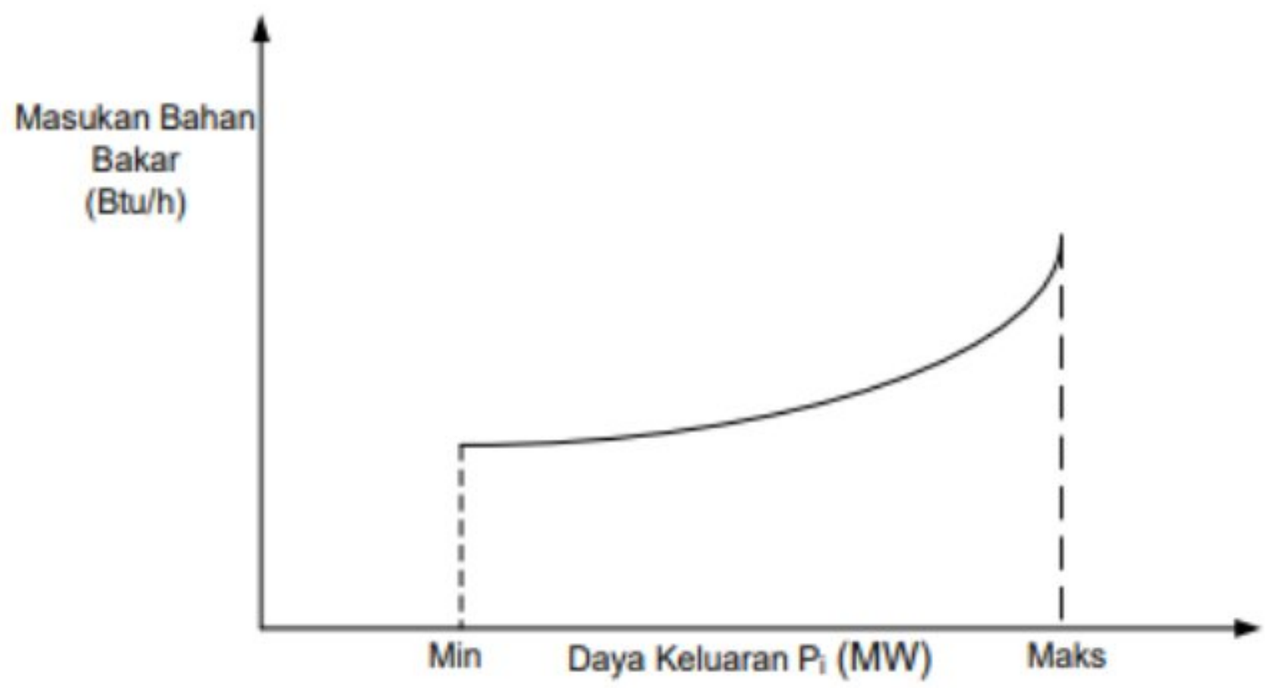
$$\frac{dF_i}{dP_i} \geq \lambda \qquad \text{for } P_i = P_{i,max}$$

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

2.4. Karakteristik Pembangkit Listrik Tenaga Thermal

Biaya operasi unit pembangkit termis sangat ditentukan oleh besarnya biaya bahan bakar yang digunakan. Efisiensi unit pembangkit termis dapat dilihat dari karakteristik laju konsumsi bahan bakar terhadap daya keluaran. Laju konsumsi bahan bakar unit pembangkit pada dasarnya merupakan besar biaya yang harus dikeluarkan untuk per-MegaWatt (MW) daya keluaran yang dihasilkan oleh unit pembangkit tersebut.



Gambar 2. 4 Kurva *Input-Output* Pembangkit

(Wood & Wollenberg, 1996)

Pada pembangkit termis masukan atau bahan bakar dinyatakan dalam BTU *(British Thermal Unit)*/h (*hour*) atau (total cost per hour) dan keluaran dinyatakan dalam MW (Mega Watt). Kurva hubungan antara masukan dan keluaran atau karakteristik *input-output* pembangkit dapat dilihat pada gambar 2.14. Kurva tersebut diperoleh dari hasil *Heat Rate Test*. Dengan *heat rate test* akan diperoleh titik-titik data biasanya tidak jatuh pada kurva yang halus. Gambar 2.4. adalah bentuk ideal dan pendekatan dari titik-titik data tersebut. Daya keluaran minimum

Optimization Software:
www.balesio.com

(min) dan maksimum (maks) merupakan batasan pada pengoperasian pembangkit (Wood & Wollenberg, 1996).

2.4.1. Fungsi Konsumsi Batubara

Pada semua kasus praktis, konsumsi bahan bakar *i* bisa digambarkan sebagai fungsi kuadrat dari pembangkit listrik nyata (Saadat, 1999)

$$C_i = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^{\,2}$$

Keterangan:

C_i = Konsumsi batubara pada pembangkit unit *i* (T/h)

P_i = Daya keluaran pada pembangkit unit *i* (MW)

α_i, β_i, γ_i = Koefisien biaya operasi pembangkit

i = 1, 2, 3,....., n (untuk n pembangkit)

2.4.2. Fungsi Biaya Bahan Bakar

Hubungan antara biaya bahan bakar terhadap daya aktif yang dihasilkan pembangkit dirumuskan oleh persamaan berikut (Susilo et al., 2014).

$$Fi(P_i) = a_i P_i^{\,2} + b_i P_i + c_i$$

Keterangan:

$Fi(P_i)$ = Biaya operasi tiap unit pembangkit ($/h)

P_i = Daya keluaran tiap unit pembangkit (MW)

a_i, b_i, c_i = Koefisien biaya operasi pembangkit

i = 1, 2, 3,....., n (untuk n pembangkit)

2.5. Emisi Pembangkit Thermal

Emisi mengacu pada zat, energi dan atau komponen lain yang dihasilkan oleh kegiatan yang masuk dan atau dimasukkannya ke dalam udara ambien dengan

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

atau tanpa unsur yang berpotensi mencemari (Nugrainy et al., 2015). Udara bebas atau udara ambien yang ada di sekitar manusia sangat berpengaruh terhadap kesehatan masyarakat. Hal ini karena manusia dalam bernapas setidaknya membutuhkan udara 8 liter/menit dengan alveoli di paru-paru sebagai tempat pertukaran gas, sehingga akan langsung mempengaruhi paru-paru, jantung, sistem sirkulasi darah dan organ lainnya. Pencemaran udara sangat signifikan sebagai faktor risiko bagi kesehatan manusia (Purwanta, 2018).

Dari perspektif penjadwalan emisi, dua emisi terbesar yang dihasilkan pembangkit listrik adalah sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NOx). Di pembangkit listrik, sulfur berasal dari bahan bakar. Saat proses pembakaran terjadi, sebagian sulfur dalam bahan bakar bergabung dengan oksigen di udara pembakaran membentuk SOx (Basu, 2011). SO_2 dan NOx dapat menyebabkan terjadinya hujan asam atau de-posisi asam. Selain itu dampak lain dari kedua emisi tersebut, yaitu dapat menyebabkan penurunan populasi dan kehidupan biota air, membilas unsur hara pada tanah sehingga menurunkan kesuburan lahan pertanian dan kerusakan hutan. Sedangkan pada manusia, emisi SO_2 dan NOx dapat menyebabkan gangguan kesehatan seperti rusaknya kardiovaskular.

Sulfur oksida merupakan pencemar yang paling umum, terutama yang ditimbulkan akibat pembakaran bahan bakar fosil, yang mengandung sulfur tinggi dalam bentuk sulfur organic dan inorganic (Nugrainy et al., 2015). Jika dilepaskan ke atmosfer, kombinasi SO_2 dengan oksigen dan air akan membentuk asam sulfat yang berpotensi berbahaya bagi lingkungan seperti hujan asam.

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

NOx dalam pembahasan polusi udara biasanya mengacu pada gas NO dan NO2. Pembentukan NOx dalam pembakaran umumnya dikontrol oleh tiga jalur, mengacu sebagai NOx termal, NOx bahan bakar dan NOx segera (*prompt*). Emisi Emisi NOx sangat bervariasi tergantung pada jenis bahan bakar dan jenis pembakaran. Dampak NO_2 pada kesehatan bervariasi dengan tingkat paparan. Paparan dari beberapa menit sampai dengan satu jam pada level antara 50-100 ppm NO_2, menyebabkan membengkaknya kulit paru-paru selama 6-8 minggu. Paparan pada 150-200 ppm NO_2 menyebabkan hilangnya fibrasi tenggorokan (*bronchiolitis fibrosa obliterans*), suatu kondisi yang fatal dalam 3-5 minggu setelah terpapar. Kematian akan datang jika terpapar NO_2 sebanyak 500 ppm atau lebih dalam waktu 2-10 hari.

2.5.1. Fungsi Emisi

Penjadwalan emisi dianggap sebagai fungsi objektif yang dapat meminimalkan emisi yang dihasilkan oleh pembangkit listrik dengan tetap mencapai batasan yang ditentukan. Besarnya emisi yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga fosil bergantung pada jumlah listrik yang dihasilkan oleh pembangkit. Fungsi emisi yang dihasilkan oleh pembangkit dapat dirumuskan sebagai berikut (Pratama et al., 2016).

$$Ei(Pi) = \alpha_i + \beta P_i + \gamma P_i^2$$

Keterangan:

$E_i\ (P_i)$	= Emisi tiap unit pembangkit (ppmvd)
P_i	= Daya keluaran tiap unit pembangkit (MW)
α, β, γ	= Koefisien emisi pembangkit

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

i = 1, 2, 3,....., n (untuk n pembangkit)

2.6. Metode Iterasi Lambda

Iterasi lambda merupakan salah satu metode yang digunakan dalam penjadwalan ekonomis. Dalam metode ini, nilai (λ) diperoleh dengan menurunkan persamaan karakteristik kemudian akan didapatkan nilai terbaik dengan menyamakan semua nilai lambda (λ) pada setiap persamaan karakteristik unit pembangkit (Monice & Syafii, 2013).

2.7. SPSS

SPSS adalah *software* yang digunakan untuk analisis statistik. Versi pertama SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) dirilis pada tahun 1968 dan dibuat oleh Norman Nie, lulusan Fakultas Ilmu Politik Universitas Stanford, yang sekarang menjadi Profesor Peneliti di Fakultas Ilmu Politik di Universitas Stanford dan Profesor Emeritus Ilmu Politik di Universitas Chicago.

Peneliti pasar, peneliti kesehatan, perusahaan riset, pemerintah, peneliti pendidikan, organisasi pemasaran, dan berbagai profesi lainnya juga menggunakan SPSS. Selain analisis statistik, *software* SPSS dasar juga memiliki manajemen data (pemilihan kasus, penajaman file, pembuatan data turunan) dan dokumentasi data (kamus metadata yang dilampirkan pada data). Statistik yang termasuk *software* dasar SPSS:

- Statistik Deskriptif: Tabulasi Silang, Frekuensi, Deskripsi, Penelusuran, Statistik Deskripsi Rasio
- Statistik Bivariat: Rata-rata, t-test, ANOVA, Korelasi (bivariat, parsial, jarak), Nonparametric tests

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

- Prediksi Hasil Numerik: Regresi Linear
- Prediksi untuk mengidentifikasi kelompok: Analisis Faktor, Analisis Cluster (twostep, K-means, hierarkis), Diskriminan.

SPSS dapat membaca berbagai jenis data, atau langsung menginput data ke SPSS Data Editor. Terlepas dari struktur file data asli, data di SPSS Data Editor harus berupa baris (*cases*) dan kolom (*variables*). Baris (*cases*) berisi informasi dari unit analisis, dan kolom (*variables*) adalah informasi yang dikumpulkan dari setiap *case*.

Hasil analisis ditampilkan di SPSS Output Navigator. Sebagian besar proses sistem dasar menghasilkan tabel pivot dimana kita dapat meningkatkan tampilan *output* yang dikeluarkan oleh SPSS. Untuk meningkatkan *output*, SPSS dapat meningkatkan *output* sesuai dengan kebutuhan (Kementerian Pendidikan, 2014)

2.8. MATLAB

MATLAB merupakan salah satu *software* yang digunakan untuk pemrograman, analisis, dan perhitungan matematis berbasis matriks. Kepanjangan dari MATLAB adalah *Matrix Laboratory* karena dapat menyelesaikan masalah perhitungan dalam bentuk matriks. Cleve Moler merilis MATLAB versi pertama pada tahun 1970. Awalnya, MATLAB dirancang untuk menyelesaikan masalah persamaan aljabar linier. Seiring berjalannya waktu, program terus berkembang dalam hal fungsionalitas dan kinerja komputasi.

Pada saat ini MathWorks Inc. mengembangkan bahasa pemrograman dengan menggabungkan proses pemrograman, perhitungan, dan visualisasi dalam lingkungan kerja yang mudah digunakan. Keunggulan lain dari MATLAB yaitu

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner

dapat digunakan untuk pengembangan aplikasi dan grafik data, pengembangan algoritma, pemodelan dan simulasi, visualisasi grafik 2D dan 3D, serta pengembangan aplikasi antarmuka grafis. MATLAB digunakan sebagai sarana pembelajaran matematika, teknik, dan pemrograman ilmiah tingkat pemula dan lanjutan di ruang lingkup pendidikan tinggi,, sedangkan dalam ruang lingkup industri, MATLAB dipilih sebagai alat penelitian, pengembangan, dan analisis produk industri.

Windows, Linux, dan mac OS merupakan sistem operasi yang dapat mengoperasikan MATLAB. Selain itu, MATLAB juga dapat ditautkan dengan aplikasi atau bahasa pemrograman eksternal lainnya (seperti C, Java, NET, Microsoft Excel). MATLAB juga memiliki *toolbox* yang dapat digunakan untuk aplikasi khusus. Beberapa aplikasi khusus yang dapat diselesaikan menggunakan MATLAB, yaitu pemrosesan sinyal, sistem kendali, logika *fuzzy*, jaringan syaraf tiruan, optimisasi, pengolahan citra digital, bioinformatika, simulasi dan berbagai teknologi lainnya (Tjolleng, 2017).

Optimization Software:
www.balesio.com

Dipindai dengan CamScanner