

LAPORAN KERJA PRAKTIK

OPTIMASI PEMBEBANAN UNIT PEMBANGKIT MENGGUNAKAN *SOFTWARE* ETAP 12.6

Untuk Memenuhi Sebagian
Persyaratan Mencapai Derajat Sarjana S-1



Oleh :
NOVRI AMSYAH
1021711032

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BANGKA BELITUNG
2020

**LEMBAR PENGESAHAN
LAPORAN KERJA PRAKTIK**

**OPTIMASI PEMBEBANAN UNIT PEMBANGKIT MENGGUNAKAN
SOFTWARE ETAP 12.6**

Disusun oleh :

NOVRI AMSYAH

1021711032

Telah diperiksa dan disetujui
Tanggal November 2020

Dosen Pembimbing,

Pembimbing Lapangan,

Asmar, S.T.,M.Eng

NP. 307406003

Asmar, S.T.,M.Eng

NP. 307406003

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro,

Fardhan Arkan, S.

NP. 307406003

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan barokah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Kerja Praktek dengan judul “Optimasi Pembebanan Unit Pembangkit Menggunakan *Software* ETAP 12.6”.

Laporan Kerja Praktek ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar sarjana S-1 pada Jurusan Teknik Elektro Universitas Bangka Belitung. Di dalam penulisan laporan kerja praktek ini penulis telah mendapat bantuan pemikiran serta dorongan moril dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Wahri Sunanda, S.T., M.Eng. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Bangka Belitung
2. Bapak Fardhan Arkan, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Bangka Belitung.
3. Bapak Rudy Kurniawan, S.T., M.T. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
4. Bapak Asmar, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing Kerja Praktik.
5. Seluruh rekan-rekan yang membantu dalam penyelesaian laporan ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan kerja praktek ini banyak terdapat kekurangan karena keterbatasan pengetahuan penulis tentang masalah yang penulis sampaikan. Oleh karena itu, saran dan kritik yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhirnya penulis berharap laporan kerja praktek ini dapat bermanfaat bagi yang membacanya, terutama untuk diri penulis pribadi.

Balunijuk, November 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL	vii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Keaslian Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Dasar Teori.....	7
2.2.1 Sistem Tenaga Listrik	7
2.2.2 Operasi Sistem Tenaga Listrik	11
2.2.3 <i>Optimal Power Flow (OPF)</i>	13
2.2.4 <i>Software ETAP 12.6</i>	16
2.2.5 OPF pada ETAP 12.6.....	17
2.2.6 <i>Software MATLAB</i>	19
2.2.7 Metode Iterasi Lambda.....	19
BAB III METODE PENELITIAN	20
3.1 Studi Literatur dan Referensi.....	20
3.2 Inisialisasi Data Awal Masukan Unit Pembangkit	20
3.3 Single Diagram Pembangkitan dan Penginputan Data Masukan pada <i>Software ETAP 12.6</i>	22
3.4 Running Simulasi OPF pada <i>Software ETAP 12.6</i>	26

3.5 Validasi Hasil Simulasi OPF ETAP 12.6 Dengan Metode Iterasi Lamda dan Fmincon MATLAB	26
3.6 Diagram Alir Penelitian	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	28
4.1 Hasil Simulasi Pembebanan Pembangkit Menggunakan <i>Software</i> ETAP 12.6	28
4.2 Validasi Hasil Simulasi Pembebanan Pembangkit ETAP 12.6 dengan Metode Iterasi Lamda dan Fmincon MATLAB	31
4.3 Perbandingan Biaya Pembangkit dari Metode Optimasi ETAP 12.6, Iterasi Lamda dan Fmincon	33
BAB V PENUTUP	34
5.1 Kesimpulan.....	34
5.2 Saran	34
DAFTAR PUSTAKA	35

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tujuan operasi sistem tenaga listrik.....	13
Gambar 3.1 Diagram segaris pembangkit 5 bus pada <i>software</i> ETAP	23
Gambar 3.2 Penginputan data awal kapasitas generator	24
Gambar 3.3 Pengnputan data awal <i>fuel cost</i> generator	24
Gambar 3.4 Pengnputan data awal beban.....	25
Gambar 3.5 Pengnputan data awal saluran	26
Gambar 4.1 Hasil simulasi saluran kondisi 1 menggunakan ETAP 12.6	29
Gambar 4.2 Hasil simulasi saluran kondisi 2 menggunakan ETAP 12.6	30

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data masukan beban pada tiap bus.....	21
Tabel 3.2.1 Data saluran kondisi 1	21
Tabel 3.2.2 Data saluran kondisi 2	22
Tabel 3.3 Data koefisien biaya bahan bakar dan kapasitas pembangkit	22
Tabel 4.1 Hasil optimasi pembebanan pembangkit saluran kondisi 1.....	28
Tabel 4.2 Hasil optimasi pembebanan pembangkit saluran kondisi 2.....	30
Tabel 4.3 Hasil optimasi pembebanan unit pembangkit metode Iterasi Lamada	32
Tabel 4.4 Perbandingan hasil <i>output</i> daya OPF ETAP 12.6 dengan metode Iterasi Lamda dan Fmincon	33
Tabel 4.5 Perbandingan Biaya Bahan Bakar Setelah Optimasi ETAP 12.6, Iterasi Lamda dan Fmincon	33

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini energi listrik telah menjadi suatu kebutuhan utama bagi manusia, seperti kebutuhan utama yang lain. Hampir semua aktivitas manusia membutuhkan tenaga listrik. Kebutuhan akan tenaga listrik selalu bertambah dari waktu ke waktu. Agar tetap dapat melayani kebutuhan tenaga listrik, maka pembangkitan tenaga listrik haruslah dikembangkan senada dengan kenaikan kebutuhan akan tenaga listrik tersebut. Permintaan tenaga listrik yang terus bertambah menyebabkan tenaga listrik yang harus disuplai oleh pembangkit menjadi sangat besar. Banyak sekali hal yang mempengaruhi pembangkitan tenaga listrik, salah satu yang paling utama adalah penggunaan bahan bakar. Selain itu, peningkatan kebutuhan tenaga listrik harus diimbangi dengan pengelolaan sumber pembangkit yang baik. Sehingga mampu menyediakan tenaga listrik ekonomis dan tetap menjaga kualitas yang kontinuitas, seimbang, stabil dan persentase harmonik yang rendah

Dengan terus meningkatnya permintaan beban ditambah semakin mahalnya bahan bakar untuk membangkitkan tenaga listrik, maka produsen listrik dituntut untuk dapat mengatur pembangkitan listrik secara efisien. Pembangkitan yang efisien adalah pembangkitan yang tetap memenuhi permintaan beban dengan biaya pembangkitan paling minimal. Dengan mengatur pembangkitan secara efisien maka permintaan beban akan tetap terpenuhi dan produsen listrik tidak mengalami kerugian dalam memproduksi listrik.

Optimal Power Flow (OPF) atau optimal aliran daya adalah pengaturan terhadap pembebanan pembangkit sehingga didapatkan nilai yang paling optimal. Dalam studi sistem tenaga OPF merupakan suatu cara yang dilakukan untuk mendapatkan pola operasi dengan mengoptimalkan fungsi obyektif tertentu dengan mempertimbangkan batasan-batasan yang berlaku. Fungsi obyektif yang dioptimalkan dalam hal ini adalah fungsi biaya bahan bakar, batasan – batasan yang dicakup antara lain batasan pembangkitan daya aktif serta daya reaktif unit

pembangkit, batasan tegangan yang diizinkan pada masing-masing bus dan batasan pembebanan saluran. Penyelesaian OPF dapat diperoleh dan diselesaikan dengan menggunakan *software* ETAP.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan kondisi pembebanan daya aktif yang paling optimal dari setiap unit pembangkit dengan mempertimbangkan fungsi biaya bahan bakar setiap pembangkit dan batasan daya aktif pembangkitan menggunakan *software* ETAP 12.6, sehingga diperoleh pengoperasian pembangkit yang tetap dapat memasok listrik dengan kualitas baik dan efisien.

1.2 Rumusan Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaturan optimasi aliran daya unit pembangkit melalui simulasi OPF pada *software* ETAP 12.6 ?
2. Bagaimana kondisi yang optimal dari pembebanan unit pembangkit ?
3. Apakah ETAP 12.6 memperhitungkan losses saluran dalam melakukan *optimal power flow* ?

1.3 Batasan Permasalahan

Dalam penyelesaian masalah penelitian ini terdapat beberapa batasan-batasan dan asumsi sebagai berikut :

1. Simulasi dilakukan menggunakan *software* ETAP 12.6.
2. Hanya menentukan besar daya aktif dibangkitkan oleh setiap pembangkit.
3. Data beban sudah ditetapkan diawal.
4. *Test systems* menggunakan Sistem 5 bus.
5. Fungsi objektif yang diatur secara optimal, yaitu fungsi biaya pembangkitan, dan fungsi batasan kapasitas daya aktif pembangkit

1.4 Tujuan Permasalahan

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah :

1. Melakukan pengaturan optimasi aliran daya unit pembangkit melalui simulasi OPF pada *software* ETAP 12.6.
2. Untuk mendapatkan kondisi yang optimal dari pembebanan unit pembangkit.
3. Untuk mengetahui *losses* saluran mempengaruhi tidaknya terhadap hasil simulasi OPF ETAP 12.6

1.5 Keaslian Penelitian

Adapun hasil-hasil penelitian terdahulu yang dilakukan oleh :

Pertiwi, Syahrizal, dan Ramdhan (2018) dalam penelitiannya yang berjudul “Analisa *Economic Dispatch* pada Unit Pembangkit Menggunakan Metode Iterasi Lambda Berdasarkan *Base Point And Participation Factors*”.

Tamin, Karnoto, Facta (2018) dalam penelitiannya yang berjudul “Optimisasi Penjadwalan Ekonomis pada Unit Pembangkit PLTG di PLTGU PT Indonesia Power Tambak Lorok Menggunakan Metode *Differential Evolution Algorithm*”.

Prasetya, Hardiansyah, Arsyad (2019), dalam penelitiannya yang berjudul “Penyelesaian *Economic Dispatch* Menggunakan Metode *Differential Evolution Algorithm*”.

Kanata (2017), dalam penelitiannya yang berjudul “Pembangkitan Ekonomis pada Unit Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Telaga Gorontalo Menggunakan Algoritma Genetika”.

Mahaputra, Rony, dan Ardyono (2017), dalam penelitiannya yang berjudul “*Economic dan Emission dispatch* pada Sistem Kelistrikan 500 kV Jawa-Bali Menggunakan *Composite Generation Cost Function* dengan Metode *Cuckoo Optimization Algorithm*”.

Penelitian yang akan dilakukan selanjutnya mengacu pada penelitian yang dilakukan sebelumnya, penelitian yang penulis angkat berjudul “Optimasi pembebanan unit pembangkit menggunakan *Software* ETAP 12.6”. dengan tujuan

mendapatkan kondisi pembebanan yang paling optimal dari unit pembangkitan. Untuk memvalidasi hasil optimasi yang didapatkan dari simulasi ETAP 12.6 penulis membandingkan hasil optimasi dengan Fmincon MATLAB dan metode Iterasi Lamda.

1.6 Sistematika Penulisan

Uraian pembahasan kerangka laporan yang akan disusun secara terperinci, sehingga diperoleh hubungan dan ruang lingkup yang jelas, Penulisan penelitian ini dibagi ke dalam beberapa bagian, sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Dalam bab ini diuraikan mengenai latar belakang penulisan, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, keaslian penelitian dan sistematika penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Berisikan tinjauan pustaka dan landasan teori yang menjelaskan tentang sistem tenaga listrik, operasi sistem tenaga listrik, *Optimal Power Flow* (OPF), ETAP, OPF pada ETAP, MATLAB, dan Iterasi Lamda

BAB III METODE PENELITIAN

Berisikan materi penelitian, langkah penelitian dan metode-metode yang digunakan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisikan pembahasan yang dilakukan pada penelitian dan hasil yang diperoleh dari penelitian

BAB V PENUTUP

Berisikan kesimpulan yang diambil berdasarkan hasil dan pembahasan yang merupakan jawaban dan tujuan penelitian juga saran untuk penelitian selanjutnya

DAFTAR PUSTAKA

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam pembuatan Laporan ini penulis menggunakan beberapa referensi mengenai operasi penjadwalan ekonomis unit pembangkit. Beberapa referensi memiliki keterkaitan dengan perancangan yang penulis lakukan, walaupun terdapat kemiripan dan kesamaan dalam perihal tujuan, maksud, dan pengaplikasiannya. Berikut ada beberapa kutipan pokok dalam beberapa jurnal atau karya tulis lain.

Pertiwi, Syahrizal, dan Ramdhan (2018) dalam penelitiannya yang berjudul “Analisa *Economic Dispatch* pada Unit Pembangkit Menggunakan Metode Iterasi Lambda Berdasarkan *Base Point And Participation Factors*”. Penulis menjelaskan bahwa memperoleh biaya pembangkitan yang optimum dan ekonomis diperlukan dalam pengoperasian sistem tenaga listrik. Penulis dalam permasalahannya menggunakan metode Iterasi Lambda yang didasarkan pada *base point and participation factor*, dari hasil yang didapatkan memberikan total biaya yang lebih ekonomis serta pengoperasian unit pembangkit yang lebih optimal. Total biaya yang dihasilkan Rp. 234.594.350 dari 24 jam total pembebanan.

Tamin, Karnoto, Facta (2018) dalam penelitiannya yang berjudul “Optimisasi Penjadwalan Ekonomis Pada Unit Pembangkit PLTG di PLTGU PT. Indonesia Power Tambak Lorok Menggunakan Metode *Differential Evolution Algorithm*”. Penulis menjelaskan bahwa mendapatkan pengoperasian pembangkit yang optimal diperlukan penjadwalan operasi pembangkitan. *Differential Evolution Algorithm* (DEA) yang diusulkan penulis sebagai metode penjadwalan ekonomis pada PLTG di PLTGU Tambak Lorok dan sebagai validasi penulis membandingkan hasil metode DEA dengan metode Lagrange Multiplier. Hasilnya keadaan operasi sistem dan keadaan diskret tidak memiliki perbedaan yang ekstrim. didapatkan bahwa pada operasi diskret didapat rata-rata penghematan sebesar 1916,260\$/jam. Pada operasi sistem didapat rata-rata penghematan sebesar 1914,408\$/jam.

Prasetya, Hardiansyah, Arsyad (2019), dalam penelitiannya yang berjudul “Penyelesaian Economic Dispatch Menggunakan Metode *Differential Evolution Algorithm*”. Penulis menjelaskan dalam mendapatkan daya yang optimal serta biaya pembangkitan minimum bisa diaplikasikan menggunakan metode modern, yaitu *Differential Evolution* (DE). Penulis melakukan pengujian untuk sistem 20 unit generator dengan pembebanan 3050 MW dan memperhitungkan rugi-rugi transmisi. Didapatkan hasil biaya bahan bakar lebih murah sebesar 74154,9881 (\$/h) ($\pm 0,2495\%$), *Losses* sebesar 128,0204 MW ($\pm 17,6414\%$). Dengan itu penulis mendapatkan hasil yang hemat dari kapasitas pembangkitan karena menyesuaikan dengan hasil perhitungan operasi ekonomis.

Kanata (2017), dalam penelitiannya yang berjudul “Pembangkitan Ekonomis pada Unit Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Telaga Gorontalo Menggunakan Algoritma Genetika”. Menjelaskan bahwa Salah satu skema penghematan biaya bahan bakar pembangkitan bisa dilakukan dengan optimasi. Penulis memilih menggunakan metode algoritma genetika yang dinilai mampu menghilangkan permasalahan yang memiliki karakteristik tidak linier, tidak cembung, integer/diskrit, tidak kontinu, dan sistem dengan jumlah variabel yang banyak. Diperoleh dari penelitian sanggup meminimalkan biaya pembangkitan lebih memuaskan. Dengan hasil akhir sistem sebenarnya dan didapatkan total biaya sebesar Rp. 20.201.000,00 per jam dengan total pembebanan 5.000 kW.

Mahaputra, Rony, dan Ardyono (2017), dalam penelitiannya yang berjudul “*Economic dan Emission dispatch* pada Sistem Kelistrikan 500 kV Jawa-Bali Menggunakan *Composite Generation Cost Function* dengan Metode *Cuckoo Optimization Algorithm*”. Penulis menjelaskan di pulau Jawa dan Bali pembangkit listrik banyak disuplai oleh pembangkit termal bahan bakar batu bara. Perlu dilakukan penghematan guna untuk menemukan pengaturan pembebanan optimal unit pembangkit. Dengan daya total kebutuhan yang perlu dibangkitkan oleh setiap generator untuk mencukupi permintaan beban sebesar 11363.4 MW,. Biaya total yang diperlukan pembangkit berdasarkan simulasi menggunakan metode *Cuckoo search* sebesar 6,847,332,395 Rp/jam. Sedangkan total emisi dari hasil pembakaran adalah 52,241,497.24 gram/jam.

2.2 Landasan Teori

2.2. 1. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah sebuah sistem yang terdiri dari komponen – komponen penyusun tenaga listrik. Secara umum komponen – komponen dalam sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga bagian, yakni Pembangkit tenaga listrik, jaringan transmisi – distribusi dan beban.

1. Pembangkit Tenaga Listrik

Pembangkit tenaga listrik adalah tempat dimana tenaga listrik dibangkitkan yang terdiri dari beberapa komponen utama, diantaranya adalah generator dan *prime mover*. Generator sendiri merupakan mesin listrik yang mengkonversi energi kinetik menjadi energi listrik. Energi kinetik yang didapatkan oleh generator berasal dari penggerak mula (*prime mover*). Energi kinetik penggerak mula ini bisa didapatkan dengan berbagai macam sumber. Ada yang menggunakan energi potensial dari alam, seperti energi potensial air dan angin. Ada yang menggunakan energi termal seperti batubara, gas alam, bahan bakar minyak hingga nuklir. Ada juga yang menggunakan energi matahari, yaitu *Photovoltaic* (PV).

a. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Pembangkit listrik tenaga air merupakan pembangkit listrik yang menggunakan energi potensial air sebagai sumber energi penggerak turbin. PLTA biasanya memiliki bendungan untuk menampung air dalam jumlah besar dengan ketinggian tertentu. Dari ketinggian ini kemudian dibuat jalur dengan sudut kemiringan tertentu sehingga didapatkan kecepatan air yang sesuai untuk mendapatkan tenaga yang diinginkan. PLTA dengan bendungan juga memiliki pengatur debit air agar bisa mendapatkan debit air yang sesuai dengan kebutuhan beban. Air yang memasuki jalur turbin juga harus steril dari mikroorganisme. Oleh karena itu ada penampungan khusus untuk dilakukan sterilisasi air agar air tidak mengandung mikroorganisme. Hal ini bertujuan untuk menjaga jalur air yang dilewati air tetap steril dan tidak kotor, juga menjaga turbin dari kerusakan yang ditimbulkan oleh adanya mikroorganisme itu sendiri, seperti adanya lumut dan

karat. Contoh PLTA di Indonesia adalah PLTA Saguling Purwakarta, Jawa Barat dan PLTA Lamjan di Bandung, Jawa Timur.

b. Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pembangkit dengan tenaga angin memanfaatkan kekuatan hembusan angin untuk memutar turbin yang berbentuk baling – baling. Posisi turbin dan generator harus memiliki ketinggian tertentu agar mendapatkan kecepatan angin yang sesuai. Kecepatan angin pun harus memenuhi nilai tertentu, yakni minimal 3 m/s dan maksimal 20 m/s.

c. Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit dengan tenaga uap ada beberapa jenis, namun yang ada di Indonesia untuk saat ini menggunakan bahan bakar batubara dan panas bumi. Prinsip kerja kedua pembangkit ini sama, yakni energi panas dari bahan baku yang dibakar atau panas dari perut bumi disalurkan ke dalam boiler (ketel uap). Dalam boiler ini terdapat pipa – pipa yang berisi air, yang nantinya dipanaskan dalam boiler. Semakin lama air dalam pipa tersebut mengalami penguapan dan kenaikan suhu yang signifikan. Akibatnya uap air menjadi bertekanan tinggi dan memutar turbin gas. Putaran turbin yang satu shaft dengan generator kemudian menghasilkan energi listrik. Uap air yang memiliki suhu tinggi tadi kemudian didinginkan kembali melalui kondensor. Pendingin kondensor sendiri biasanya memanfaatkan air laut. Oleh karena itu biasanya pembangkit listrik dengan batubara memiliki lokasi di pinggir laut. Selain pendinginan yang menggunakan air laut, pengiriman dan penyimpanan lebih mudah dilakukan dengan transportasi laut (menggunakan kapal tongkang). Pembangkit tenaga batubara contohnya adalah PLTU Paiton dan Suralaya

d. Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG/PLTGU)

Pembangkit listrik tenaga gas memiliki prinsip yang sedikit berbeda dengan pembangkit termal batubara dan panas bumi. Pada pembangkit ini, gas yang disalurkan melalui pipa ditampung ke dalam tabung kompresor terlebih dahulu sehingga memiliki tekanan yang sangat tinggi. Setelah itu gas bertekanan tinggi ini dicampurkan dengan intake gas lainnya, yakni udara sekitar yang juga telah

dimampatkan terlebih dahulu. Setelah campuran sesuai, kemudian gas campuran ini masuk ke dalam ruang bakar (*combustion chamber*) dan menghasilkan tekanan yang sangat tinggi. Energi kalor dari pembakaran inilah yang kemudian digunakan untuk memutar turbin gas dan memutar generator untuk menghasilkan tenaga listrik. Untuk PLTGU, setelah gas tersebut digunakan untuk memutar turbin, maka hawa panas tidak langsung dibuang, melainkan dimanfaatkan kembali untuk memanaskan air dalam boiler. Proses pemanasan kembali ini disebut dengan HRSG (*Heat Recovery Generator System*) yang kemudian air menjadi uap bertekanan dan digunakan untuk memutar turbin kembali. Pada beberapa industri di Indonesia gas panas dari PLTG digunakan kembali untuk keperluan industri, seperti memanaskan air dan proses kimiawi. Contoh PLTGU di Indonesia adalah PLTGU Gresik.

e. Pembangkit Listrik Tenaga Matahari (*Photovoltaic* / PV)

Pembangkit ini memanfaatkan Sel Surya (*solar cell*) / *photovoltaic* (PV) untuk menghasilkan energi listrik. Untuk saat ini sel surya adalah alat yang mampu mengkonversi langsung energi panas dari matahari menjadi energi listrik. Dari beberapa jenis pembangkit yang disebutkan sebelumnya, pembangkit ini sangat mendukung konsep “*Renewable energy*” selain PLT Air dan angin. Harga investasi yang dibutuhkan untuk PV juga cukup mahal. Dalam sel surya terdapat lapisan semikonduktor yang memiliki polaritas, yakni positif dan negatif. Semikonduktor ini memiliki hubungan struktur yang disebut dengan junction p-n. pada saat terkena sinar matahari, terjadi kontak antara semikonduktor tipe n dan p, sehingga terjadi medan listrik. Saat terjadi kelebihan muatan elektron akibat kontak tersebut, elektron yang berlebih kemudian disalurkan melalui material kontak yang merupakan terminal kutub dari PV.

2. Transmisi dan Distribusi

Transmisi dan Distribusi Untuk menyalurkan tenaga listrik dari produsen (pembangkit) kepada konsumen (beban) maka dibutuhkan saluran transmisi dan distribusi energi listrik. Posisi kawat saluran ada yang di atas tanah (*overhead*) dan dibawah tanah (*underground*). Untuk Indonesia jalur transmisi – distribusi yang digunakan hampir semuanya menggunakan jalur di atas tanah (*overhead*). Pada saluran transmisi tegangan dari generator biasanya dinaikkan. Hal ini bertujuan

meminimalisir rugi-rugi daya pada saluran. Pada prinsipnya daya yang hilang di saluran dihitung dengan rumus $P = I^2 R$. Dengan dinaikkannya tegangan, maka I menjadi lebih kecil (dari rumus $S = \sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot I$) dan diharapkan daya rugi – rugi saluran juga menjadi lebih kecil. Saluran transmisi dan distribusi ini dibagi – bagi berdasarkan tegangannya. Karena tegangan yang ditransmisikan atau didistribusikan berbeda, maka spesifikasi kawat atau kabel yang digunakan juga berbeda. Berdasarkan tegangannya saluran transmisi – distribusi di Indonesia dibagi menjadi :

a. Saluran Tegangan Ekstra Tinggi (200 – 500 KV)

Disebut juga saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET). Saluran transmisi ini memiliki tegangan operasi sebesar 200 KV hingga 750 KV. Untuk saat ini saluran ini merupakan saluran dengan tegangan paling tinggi di Indonesia dengan tegangan 500 KV. Pembangkitan tegangan yang sangat tinggi ini efektif digunakan untuk menyalurkan daya listrik yang jauh dari pembangkit dengan jarak diatas 100 km. Kapasitas dayanya juga sangat tinggi, yakni diatas 500 MW. Saat ini saluran 500 KV terdapat pada pulau jawa, yang membentang dari PLTU Paiton hingga Suralaya. Dari saluran ekstra tinggi ini sepanjang saluran terdapat beban maupun suplai yang telah terinterkoneksi antar pembangkit satu dengan lainnya.

b. Saluran Tegangan Tinggi (70 – 150 KV)

Disebut juga saluran udara tegangan tinggi (SUTT). Saluran transmisi ini memiliki tegangan antara 70 KV hingga 150 KV. Namun untuk saat ini tegangan operasi 70 KV mulai banyak ditinggalkan dan lebih sering digunakan tegangan operasi 150 KV. Konfigurasi jaringan pada umumnya memiliki konfigurasi single atau double circuit. Dalam *single circuit* terdapat 3 fasa saluran dengan 3 atau 4 kawat (termasuk netral). Untuk 3 kawat saluran netralnya biasanya menggunakan media tanah untuk saluran kembali. Apabila kapasitas daya yang disalurkan cukup besar bisa menggunakan lebih dari satu kawat, bisa dua atau empat kawat yang disebut dengan *bundle conductor*. Saluran ini efektif digunakan dengan jarak dibawah 100 km. Apabila lebih jauh nilai drop tegangan menjadi semakin besar.

c. Saluran Tegangan Menengah (6 – 30 KV)

Disebut juga saluran udara tegangan menengah (SUTM), dengan tegangan operasi antara 6 KV hingga 30 KV. Di Indonesia tegangan 6 KV dan 30 KV mulai banyak ditinggalkan dan lebih condong menggunakan tegangan operasi 20 KV. Saluran tegangan menengah biasa digunakan pada hubungan antara Gardu Induk, penyulang (*feeder*), gardu distribusi, hingga konsumen industri atau pelanggan dengan kapasitas besar. Relay pengaman juga mulai banyak diaplikasikan pada tegangan operasi ini. Untuk efektifitas penyaluran, pengaruh pentanahan netral dan efektifitas pengaman, maka untuk saluran menengah ini memiliki jarak efektif antara 15 hingga 20 km. Lebih jauh dari itu, dikhawatirkan efektifitas pengaman menurun.

d. Saluran Tegangan Rendah (40 – 1000 V)

Saluran ini disebut juga dengan saluran distribusi, yakni hilir dari saluran transmisi itu sendiri. Dengan kata lain, energi listrik yang dihasilkan oleh generator digunakan untuk memasok pelanggan kebutuhan konsumen rumah tangga. Di Indonesia saluran ini memiliki tegangan operasi 220/380V yang berarti tegangan bernilai 220 Volt line to netral dan 380 Volt *line to line*. Rentang tegangan yang diijinkan adalah +5% dan -10% dari tegangan operasi. Untuk saat ini penghantar yang digunakan sebagai saluran adalah *Low Voltage Twisted Cable (LVTC)* 2. 1.

3. Beban

Beban pada sistem tenaga listrik terbagi menjadi beberapa macam, seperti beban industri, beban komersil dan beban perumahan. Untuk beban industri yang sangat besar disuplai dengan menggunakan sistem transmisi. Untuk beban industri besar disuplai dengan menggunakan sistem subtransmisi dan untuk beban industri kecil disuplai dengan menggunakan sistem distribusi primer. Pada beban industri didominasi oleh beban *composite* dan beban motor induksi dengan jumlah yang banyak. Sementara pada beban komersil dan perumahan didominasi oleh beban untuk lampu-lampu penerangan, penghangat dan juga pendingin ruangan.

2.2.2. Operasi Sistem Tenaga Listrik

Tujuan Operasi Sistem Tenaga Listrik Untuk mendapatkan operasi sistem tenaga listrik yang baik maka perlu diperhatikan tiga hal berikut ini, yaitu:

1. Ekonomi (*economy*),
2. Keandalan (*security*),
3. Kualitas (*quality*).

Ekonomi (*economy*) berarti listrik harus dioperasikan secara ekonomis, tetapi dengan tetap memperhatikan keandalan dan kualitasnya.

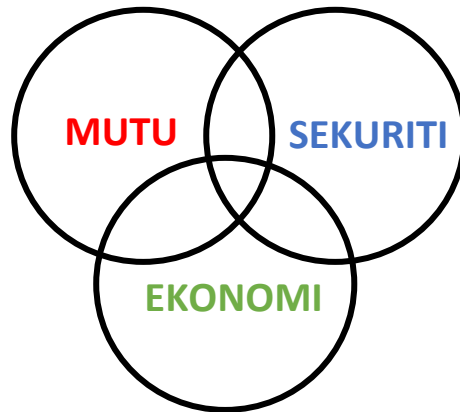
Keandalan (*security*) merupakan tingkat keamanan sistem terhadap kemungkinan terjadinya gangguan. Sedapat mungkin gangguan di pembangkit maupun transmisi dapat diatasi tanpa mengakibatkan pemadaman di sisi konsumen.

Kualitas (*quality*) tenaga listrik yang diukur dengan kualitas tegangan dan frekuensi yang dijaga sedemikian rupa sehingga tetap pada kisaran yang ditetapkan.

Didalam pelaksanaan pengendalian operasi sistem tenaga listrik, urutan prioritas dari sasaran diatas bisa berubah-ubah tergantung pada kondisi real time. Pada saat terjadi gangguan, maka keamanan adalah prioritas utama sedangkan mutu dan ekonomi bukanlah hal yang utama. Demikian juga pada saat keamanan dan mutu sudah bagus, maka selanjutnya ekonomi harus diprioritaskan.

Efisiensi produksi tenaga listrik diukur dari tingkat biaya yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Hal yang paling mudah dalam optimasi biaya produksi tenaga listrik adalah menggunakan metode pembangkit dengan biaya yang paling murah akan diprioritaskan untuk beroperasi dibandingkan dengan yang lebih mahal, sampai beban tenaga listrik tercukupi.

Sebagai gambaran dari tujuan operasi sistem tenaga listrik dapat dilihat seperti pada Gambar 2.3. dibawah ini.



Gambar 2.1 Tujuan operasi sistem tenaga listrik

2.2.3 Optimal Power Flow

Optimal *power flow* pertama kali dikembangkan pada tahun 1960-an sebagai kelanjutan dari *economic dispatch* konvensional untuk menentukan pengaturan optimal dari variabel-variabel yang dibatasi berbagai macam konstrain. *Optimal power flow* merupakan perhitungan untuk meminimalkan suatu fungsi yaitu biaya pembangkitan suatu pembangkit tenaga listrik atau rugi-rugi saluran pada sistem tenaga transmisi dengan mengatur dengan mengatur pembangkitan daya aktif dan reaktif setiap pembangkit yang terinterkoneksi dengan memperhatikan batas-batas tertentu. Batas yang umum dinyatakan dalam perhitungan analisis aliran daya optimal adalah berupa batas minimum dan maksimum untuk pembangkitan daya aktif pada pembangkit.

OPF digunakan untuk mengoptimasi aliran daya dari sistem tenaga berskala besar. Cara ini dilakukan dengan memperlakukan fungsi-fungsi objektif yang dipilih sambil mempertahankan daya guna sistem yang dapat diterima dari batas kemampuan daya pada generator.

Berikut ini merupakan fungsi sederhana yang digunakan dalam permasalahan OPF:

$$F(\bar{x}, \bar{u})$$

$$g(\bar{x}, \bar{u})$$

$$h(\bar{x}, \bar{u}) \leq 0$$

Dimana $F(\bar{x}, \bar{u})$ untuk memenuhi batasan-batasan $g(\bar{x}, \bar{u}) = 0$ dan $h(\bar{x}, \bar{u}) \leq 0$, sedangkan $g(\bar{x}, \bar{u})$ adalah nonlinier *equality constraints* (persamaan aliran daya) yang menggambarkan fisik dari sistem seperti halnya set point tegangan yang diinginkan pada seluruh sistem. Fisik dari sistem tersebut memaksa persamaan aliran daya yang diinjeksikan terutama daya aktif dan daya reaktif pada setiap bus jumlahnya sama dengan nol dan $h(\bar{x}, \bar{u})$ adalah nonlinier *inequality constraints* merupakan komponen dari peralatan sistem tenaga listrik yang memiliki batas operasi, batas ini dibuat untuk keamanan. Oleh sebab itu, fungsi objektif dapat diminimalkan dengan pemeliharaan komponen sistem tenaga listrik dengan memperhatikan batas-batas keamanan. Vektor x terdiri dari nilai variabel-variabel meliputi *voltage magnitude* dan sudut fasanya, keluaran MVar dari generator yang dirancang untuk pengaturan tegangan bus dan juga terdiri dari beberapa parameterparameter yang bernilai tetap meliputi sudut fasa pada *reference bus*, *line* parameter, dll. Vektor u berdiri dari nilai variabel control meliputi daya aktif dan daya reaktif dari pembangkitan, beban MW dan MVar.

Tujuan utama dari OPF adalah untuk menentukan pengaturan variabel kontrol dan sistem persamaan yang mengoptimalkan nilai fungsi objektif. Pemilihan fungsi ini harus didasarkan pada analisis yang cermat dari sistem daya listrik dan secara ekonomi. Variabel kontrol pada masalah aliran daya yang optimal merupakan kuantitas yang nilainya bisa disesuaikan secara langsung untuk membantu meminimalkan fungsi tujuan dan memenuhi batasan-batasan. Variabel kontrol dapat berupa: daya aktif generator, daya reaktif generator, rasio tap trafo dan tegangan bus generator.

OPF adalah upaya yang dilakukan dalam pengoperasian sistem tenaga listrik supaya daya yang dialirkan dari generator hingga sampai ke beban dengan hasil yang optimal dan murah serta tanpa mengganggu berbagai batasan-batasan pengoperasian seperti batasan minimum dan maksimum daya pembangkitan oleh generator, batasan tegangan, frekuensi, harga, faktor daya, batasan area pengoperasian, keamanan, emisi dan sebagainya.

Persamaan Matematis OPF, persamaan dari *optimal power flow* dari segi biaya pembangkitan direpresentasikan pada persamaan 2.12.

$$F_i(P_i) = \alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i \quad (2.1)$$

Keterangan :

F_i = besar biaya pembangkitan pada pembangkit ke-i (\$/jam)

P_i = daya output dari pembangkit ke-i (MW)

α_i , β_i dan γ_i adalah *cost coefficient* unit generator ke-i

Dalam memecahkan suatu masalah optimasi, seperti OPF, ada dua batasan yaitu *equality* dan *inequality constraint*. *Equality constraint* adalah batasan yang harus diikuti. Sebagai contoh dalam OPF ada persamaan keseimbangan daya aktif dan daya reaktif pada setiap bus harus selalu dicukupi.

Equality constrain pada OPF mempunyai persamaan sebagai berikut:

$$P_i = P_{gi} - P_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.2)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.3)$$

Dimana $i = 1, 2, \dots, n$ menyatakan jumlah bus. P_i dan Q_i menyatakan injeksi daya aktif dan reaktif di bus i . P_{gi} dan Q_{gi} menyatakan daya aktif dan reaktif generator di bus i . P_{di} dan Q_{di} menyatakan daya aktif dan reaktif beban di bus i . $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ menyatakan elemen dari ke $i - j$ dari matrik Y bus matrik.

Inequality constraint menggambarkan batasan operasi dan batas ini dibuat untuk batas keamanan. Berikut ini persamaan *inequality constraint* pada OPF sebagai berikut: 1) Batasan kapasitas pembangkit :

$$P_{gi \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi \max}, i = 1, 2, 3, \dots, Ng$$

$$Q_{gi \min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi \max}, i = 1, 2, 3, \dots, Ng \quad (2.4)$$

2) Batasan tegangan :

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max}, i = 1, 2, 3, \dots, Ng$$

$$\delta_{i \min} \leq \delta_i \leq \delta_{i \max}, i = 1, 2, 3, \dots, Ng \quad (2.5)$$

3) Batasan termal transmisi :

$$S_i \leq S_{i, \max} \quad (2.6)$$

Dimana:

P_i : Injeksi daya aktif di bus i

Q_i : Injeksi daya reaktif di bus i

PG_{gi} : Daya aktif di bus i

P_{di} : Pembebanan daya aktif pada bus i

QG_{gi} : Daya reaktif di bus i

P_{di} : Pembebanan daya aktif di bus i

δ_i : Sudut fasa tegangan bus i

δ_j : Sudut fasa tegangan bus j

2.2.4 Software ETAP

Dalam perancangan dan analisa sebuah sistem tenaga listrik, sebuah *software* / aplikasi yang sangat dibutuhkan untuk merepresentasikan kondisi real sebelum sebuah sistem direalisasikan. ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) Power Station 12.6 merupakan salah satu software aplikasi yang digunakan untuk mensimulasikan sistem tenaga listrik.

ETAP mampu bekerja dalam keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik, dan online untuk pengelolaan data *real-time* atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara *realtime*. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik. Analisa sistem tenaga listrik yang dapat dilakukan ETAP antara lain :

- Analisa aliran daya

- Analisa hubung singkat
- *Arc Flash Analysis*
- Starting motor
- Koordinasi proteksi
- Analisa kestabilan transien, dll.

2.2.5 OPF pada ETAP

Dalam studi aliran beban tradisional, pengaturan akhir dari banyak parameter kontrol sistem didasarkan pada pengalaman dan penilaian insinyur. Terkadang proses iteratif diperlukan untuk mencapai pengaturan akhir yang memuaskan secara keseluruhan. Proses ini bisa sangat lengkap untuk sistem besar. Parameter kontrol sistem ini biasanya adalah pengaturan LTC transformator, pembangkitan MW generator atau biaya bahan bakar, pengaturan AVR generator atau pembangkit listrik reaktif, pengaturan perangkat kompensasi var statis seri dan shunt, jumlah keseluruhan beban, dan beberapa lainnya. Dalam praktiknya, salah satu pengaturan kontrol atau kombinasi apa pun dari mereka dapat digunakan dalam sistem tertentu. Studi Aliran Daya Optimal dapat dipahami sebagai aliran beban yang cerdas. Ini menggunakan teknik pengoptimalan untuk secara otomatis menyesuaikan pengaturan kontrol sistem daya sementara itu memecahkan persamaan alur beban pada saat yang sama. Selain itu, ini memungkinkan Anda untuk menentukan berbagai kriteria pengoptimalan untuk sistem Anda dan memberlakukan batas pada jumlah sistem (tegangan bus, aliran saluran, dll.) selama proses pengoptimalan. Kriteria pengoptimalan ini disebut tujuan, biasanya indeks kinerja sistem, dan batasannya disebut kendala.

Secara matematis, studi aliran daya yang optimal dapat diekspresikan sebagai :

$$Min = f(x,u) \quad (2.7)$$

Subjek untuk *equality constraints* :

$$SP(x,u) = 0 \text{ and} \quad (2.8)$$

$$SQ(x,u) = 0 \quad (2.9)$$

Dan *inequality constraints* :

$$u_{min} \leq u \leq u_{max} \quad (2.10)$$

$$y(x,u)_{min} \leq y(x,u) \leq y(x,u)_{max} \quad (2.11)$$

Dimana,

x = vektor tegangan bus, yang disebut *state variable set*

u = vektor kontrol sistem, yang disebut *control variable set*

f = fungsi objektif, yang dinyatakan dalam x dan u

y = vektor *output* sistem, set variabel biasanya termasuk aliran garis, dll.,

P = daya nyata, diekspresikan dalam hal x dan u

Q = daya reaktif, diekspresikan dalam hal x dan u

Persamaan (2.7) menunjukkan fungsi tujuan yang ditentukan untuk diminimalkan atau dioptimalkan. Persamaan (2.8) dan (2.9) menunjukkan persamaan keseimbangan daya sistem (persamaan alur beban) yang akan diselesaikan. Persamaan (2.10) menentukan batas atas dan bawah kontrol, dan persamaan (2.11) menetapkan batas atas dan bawah untuk variabel *output*.

Analisis Aliran Daya Optimal ETAP menggunakan teknik pengoptimalan titik interior mutakhir dengan *logarithm barrier function and the prime-dual direction searching method*. Algoritma ini sangat efisien dan kuat, cocok untuk sistem ukuran besar dengan kendala kesetaraan dan ketidaksetaraan. Di sisi pemodelan sistem daya, model AC sejati digunakan, yang memungkinkan program ini untuk mencapai akurasi dan kemampuan tertinggi dalam memecahkan masalah aliran daya optimal sistem daya dari ukuran apa pun dalam kondisi apa pun yang layak.

2.2.7 Software MATLAB

MATLAB (*Matrix Laboratory*) adalah sebuah lingkungan komputasi numerikal dan bahasa pemrograman komputer generasi keempat. Dikembangkan oleh *The MathWorks*, MATLAB memungkinkan manipulasi matriks, pem-plot-an fungsi dan data, implementasi algoritme, pembuatan antarmuka pengguna, dan peng-antarmuka-an dengan program dalam bahasa lainnya. Sebuah paket tambahan, Simulink, menambahkan simulasi grafis multiranah dan Desain Berdasar-Model untuk sistem terlekat dan dinamik.

2.2.8 Metode Iterasi Lamda

Iterasi lamda merupakan salah satu metode yang digunakan dalam economic dispatch . Pada metode ini lamda (λ) dicari terlebih dahulu, kemudian dengan menggunakan syarat optimum, dihitung P_i (*output* setiap pembangkit). Dengan menggunakan konstrain diperiksa apakah jumlah total dari output sama dengan kebutuhan beban sistem.

Untuk perhitungan dengan rugi-rugi daya diabaikan, dalam sebuah teknik penyelesaian secara iterasi, harga λ didapat dari sebuah perhitungan dengan harga estimasi awal yang telah ditentukan terlebih dahulu, kemudian diselesaikan hingga nilai ΔP_i (daya nyata tambahan) sampai dalam sebuah ketelitian yang akurat.

Penyelesaian secara cepat dapat dilakukan dengan menggunakan metode gradien yang mana dari persamaan

$$\sum_{i=1}^{ng} P_i = P_d \quad (2.12)$$

$$\sum_{i=1}^{ng} \frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i} = P_d \quad (2.13)$$

$$\lambda = \frac{P_d + \sum_{i=1}^{ng} \frac{\beta_i}{2\gamma_i}}{\sum_{i=1}^{ng} \frac{1}{2\gamma_i}} \quad (2.14)$$

$$P_i = \frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i} \quad (2.15)$$

BAB III

METODELOGI PENELITIAN

3.1 Studi Literatur dan Referensi

Studi literatur adalah mencari referensi teori yang relevan dengan kasus atau permasalahan yang ditemukan. Referensi tersebut berisikan tentang penyelesaian *Optimal Power Flow* dengan berbagai macam metode seperti iterasi lamda, defferential evolution, dan lain-lain.

Referensi ini dapat dicari dari buku, jurnal, artikel laporan penelitian, dan situs-situs di internet. Output dari studi literatur ini adalah terkoleksinya referensi yang relevan dengan perumusan masalah. Tujuannya adalah untuk memperkuat permasalahan serta sebagai dasar teori dalam melakukan studi dan juga menjadi dasar untuk melakukan perhitungan *Optimal Power Flow* menggunakan *software* ETAP 12.6.

3.2. Inisialisasi Data Awal Masukkan Untuk Pembangkitan

Data sistem yang digunakan pada simulasi ini menggunakan sistem seperti gambar 3.1 *single* diagram pembangkitan. Sistem pembangkitan terdiri 5 sistem bus dan 3 unit generator. Inisialisasi data awal masukkan untuk pembangkitan dapat dilihat sebagai berikut.

Untuk data masukan kapasitas daya pembangkitan dan beban pada tiap bus dapat dilihat pada tabel 3.1 sebagai berikut.

Tabel 3.1 Data masukan beban pada tiap bus

Bus	Kapasitas daya pembangkitan	Beban				Keterangan
		P (MW)	Q (Mvar)	S (MVA)	PF (lag.)	
1	625 MVA, 500 MW	65	30	71.589	0.908	Bus berayun
2		115	60	129.711	0.887	Bus beban
3	625 MVA, 500 MW	70	40	80.623	0.868	Bus generator
4		70	30	76.158	0.919	Bus generator
5	625 MVA, 500 MW	85	40	93.941	0.905	Bus beban

Untuk data saluran digunakan 2 kondisi seperti tabel 3.2.1 dan tabel 3.2.2 sebagai berikut.

Tabel 3.2.1 Data saluran kondisi 1

Saluran	R (Ohm)	X (Ohm)	Y/2 (Mho)
Bus 1 ke Bus 2	8	32	0.000215291
Bus 1 ke Bus 5	6	24	0.000162781
Bus 2 ke Bus 3	6	24	0.000162781
Bus 3 ke Bus 4	16	64	0.000430582
Bus 3 ke Bus 5	10	40	0.000267801
Bus 4 ke Bus 5	12	48	0.000320311

Tabel 3.2.2 Data saluran kondisi 2

Saluran	R (Ohm)	X (Ohm)
Bus 1 ke Bus 2	0,00001	0,00001
Bus 1 ke Bus 5	0,00001	0,00001
Bus 2 ke Bus 3	0,00001	0,00001
Bus 3 ke Bus 4	0,00001	0,00001
Bus 3 ke Bus 5	0,00001	0,00001
Bus 4 ke Bus 5	0,00001	0,00001

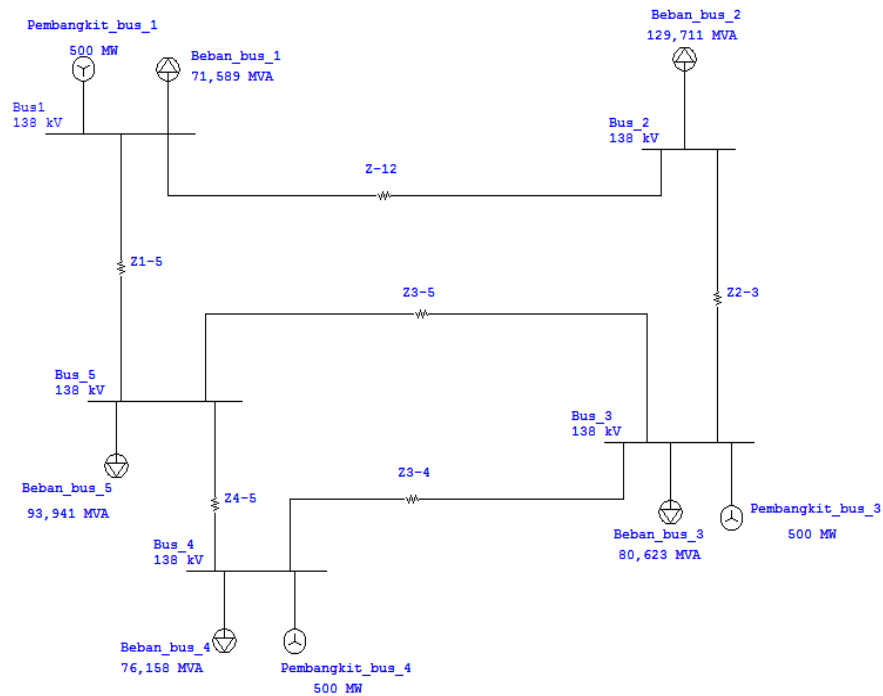
Untuk data fungsi biaya bahan bakar (\$/jam) pembangkitan pada sistem pembangkit dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Koefisien biaya bahan bakar dan kapasitas unit pembangkit

Unit Pembangkit	Fungsi Biaya Bahan Bakar			Pmin (MW)	Pmax (MW)
	α	β	γ		
Pembangkit_bus_1	0,09	1,2	600	10	300
Pembangkit_bus_3	0,12	1	335	10	270
Pembangkit_bus_4	0,11	5	150	10	250

3.3 Single Diagram Pembangkitan dan Penginput Data Masukan pada ETAP 12.6

Data sistem yang digunakan pada simulasi ini menggunakan sistem seperti gambar 3.1 diagram segaris pembangkitan. Sistem pembangkitan terdiri 5 sistem bus dan 3 unit generator. Setiap bus terdapat *load* (beban) yang nilainya sudah ditetapkan diawal seperti tabel 3.1.



Gambar 3.1 Diagram segaris pembangkitan sistem 5 bus pada software ETAP 12.6

Penginputan data awal masukan seperti data generator, data beban, data saluran dan data fungsi biaya bahan bakar pada software ETAP 12.6 sebagai berikut.

Untuk penginputan data generator dalam *optimal power flow* ETAP 12.6 ada 3 data yang dimasukan, yaitu mode operasi generator (mode *swing*, mode *voltage control*, *Mvar control* dan *PF control*), data kapasitas daya pembangkitan, dan data fungsi biaya bahan bakar (*fuel cost*).

Synchronous Generator Editor - Pembangkit_bus_3

Info Rating Capability Imp/Model Grounding Inertia Exciter Governor

138 kV 500 MW Voltage Control

Rating

MW kV % PF MVA % Eff. Poles

500 138 80 625 95 4

% of Bus kVnom FLA RPM

100 2615 1800

	Gen. Category	% V	Angle	MW	Mvar	% PF	Qmax	Qmin
1	Design	100		0			0	0
2	Normal	100		0			0	0
3	Shutdown	100		0			0	0
4	Emergency	100		0			0	0
5	Standby	100		0			0	0
6	Startup	100		0			0	0

PrimeMover Rating

Continuous Peak

HP MW HP MW

670511 500 670511 500

Mvar Limits

☐ Capability Curve ☒ User-Defined

Peak Mvar

309,872

Operating Values

% V Vangle MW Mvar

148,573 -5,1 89,295 96,718

Pembangkit_bus_3

OK Cancel

Gambar 3.2 Pengiputan data awal kapasitas generator

Synchronous Generator Editor - Gen1

Info Rating Capability Imp/Model Grounding Inertia Exciter Governor

PSS Harmonic Protection Reliability Fuel Cost Remarks Comment

0 kV 0 MW Voltage Control

Model Type Equation Curve Type Cost vs. Output

Profile Fuel Cost 0

Fuel Cost 0.01 \$/MBtu

Use Generator Limits

☒ User-Defined ☐ Operating

Min MW Max MW

0 0

Model Parameter

$y = C0 + C1x + C2x^2 + C3 \exp(Kx)$

$y = \$/\text{hr}$

$x = \text{MW}$

C0 0

C1 0

C2 0

C3 0

K 0

Cost Curve

Cost (\$/hr)

MW

Print

Gen1

OK Cancel

Gambar 3.3 Pengiputan data awal *fuel cost* generator

Untuk penginputan data awal beban pada ETAP 12.6 dilakukan seperti gambar 3.4. data berupa daya aktif, daya reaktif, daya semu dan power faktor. Tipe beban 100% konstan kVA.

Lumped Load Editor - Beban_bus_4

Info | Nameplate | Short-Circuit | Dyn Model | Reliability | Remarks | Comment

76,158 MVA 138 kV (100% Motor 0% Static)

Model Type: Conventional Rated kV: 138 Calculator...

Ratings:

MVA	MW	Mvar	% PF	Amp
76,158	70	30	91,91	318,6

Load Type: Constant kVA 100 % 100
Constant Z 0 % 0

Motor Load Static Load

Loading Category	% Loading	MW	Mvar	MW	Mvar
1 Design	100	70	30	0	0
2 Normal	100	70	30	0	0
3 Brake	0	0	0	0	0
4 Winter Load	0	0	0	0	0
5 Summer Load	0	0	0	0	0
6 FL Reject	0	0	0	0	0
7 Emergency	0	0	0	0	0
8 Shutdown	0	0	0	0	0

Operating: 0 0 0 0 MW +j Mvar

Beban_bus_4 OK Cancel

Gambar 3.4 Penginputan data awal beban

Untuk penginputan data awal saluran pada ETAP 12.6 dilakukan seperti gambar 3.5 data yang dimasukan seperti data R (ohm), X (ohm), dan Y (mho).

	R	X	Y
Pos.	6	24	0.0001627
Zero	6	24	0.0001627

Gambar 3.5 Pengiputan data awal saluran

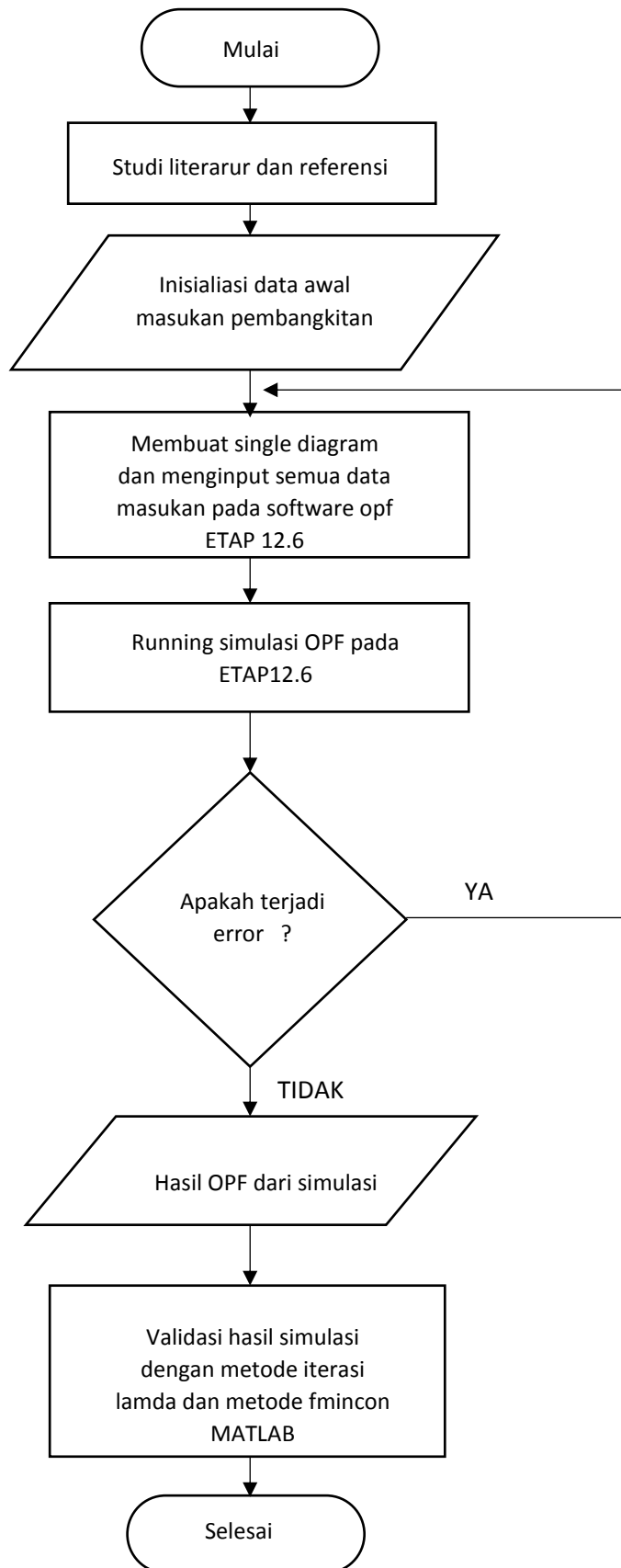
3.4 Running simulasi OPF pada software ETAP 12.6

Setelah data awal dimasukan proses selanjutnya adalah *Running* yang difungsikan untuk menjalankan program perhitungan dari semua data yang telah masukan sehingga diperoleh nilai pembebanan yang optimums esuai yang diharapkan.

3.5 Validasi Hasil Simulasi Menggunakan Metode Iterasi lamda dan fmincon MATLAB

Perbandingan simulasi OPF ETAP 12.6 dengan metode Iterasi Lamda dan metode Fmincon Matlab dilakukan untuk mengetahui keakuratan program yang telah dibuat sudah berjalan sesuai dengan perhitungan secara manual. Keberhasilan program diukur dari kemampuannya untuk menganalisis pendistribusian beban yang optimal sehingga daya yang dibangkitkan pada masing-masing unit memenuhi batas yang telah ditentukan dan juga energi yang dihemat dari pendistribusian beban mencapai nilai maksimum.

3.6 Diagram Alir Penelitian



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan simulasi *Optimal Power Flow* menggunakan *software* ETAP 12.6 dengan data sistem diagram segaris seperti yang dijelaskan pada bab 3 sebelumnya, maka diperoleh hasil dan analisa yang akan dibahas pada bab berikut.

4.1 Hasil simulasi Optimasi Pembebanan Menggunakan *Software* ETAP 12.6

Pada sub-bab ini, hasil optimasi aliran daya unit pembangkitan atau *optimal power flow* dapat diperoleh dengan menggunakan fitur simulasi OPF yang ada pada *software* ETAP 12.6. Simulasi dilakukan dengan mengasumsikan adanya dua kondisi yang berdasarkan pada nilai saluran transmisi, sehingga nantinya akan diperoleh optimasi pembebanan unit pembangkit dari masing-masing pembangkit berdasarkan kondisi saluran tabel 3.2.1 dan tabel 3.2.2.

4.1.1 Kondisi 1 Saluran

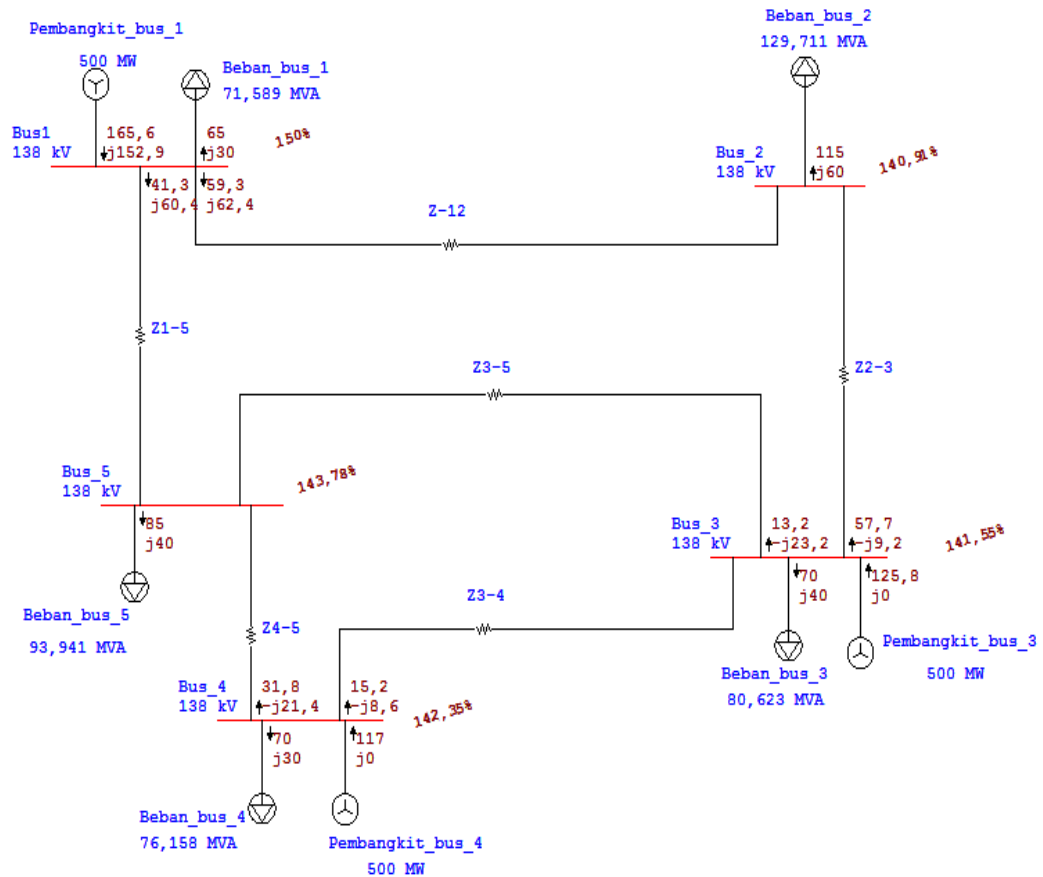
Pada kondisi 1 nilai saluran transmisi bernilai seperti tabel 3.2.1 dengan total kebutuhan beban masing-masing bus sebesar 405 MW. Diperoleh hasil optimasi pembebanan unit pembangkit sebagai berikut.

Tabel 4.1 Hasil OPF kondisi 1

Bus	Unit Pembangkit	Hasil OPF
1	Pembangkit_bus_1	165,6 MW
3	Pembangkit_bus_3	125,8 MW
4	Pembangkit_bus_4	117 MW

Setelah simulasi OPF ETAP dijalankan didapatkan hasil optimasi pembebanan pembangkit seperti tabel 4.1. Untuk pembangkit bus 1 didapatkan sebesar 165,6 MW, pembangkit bus 3 sebesar 125,8 MW, dan pembangkit bus 4 sebesar 117 MW. Hasil ini menunjukkan kondisi paling optimal yang terhitung dari

kondisi 1 melalui simulasi OPF pada ETAP 12.6. Berikut adalah tampilan hasil simulasi OPF ETAP kondisi 1 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil simulasi kondisi 1 menggunakan ETAP 12.6

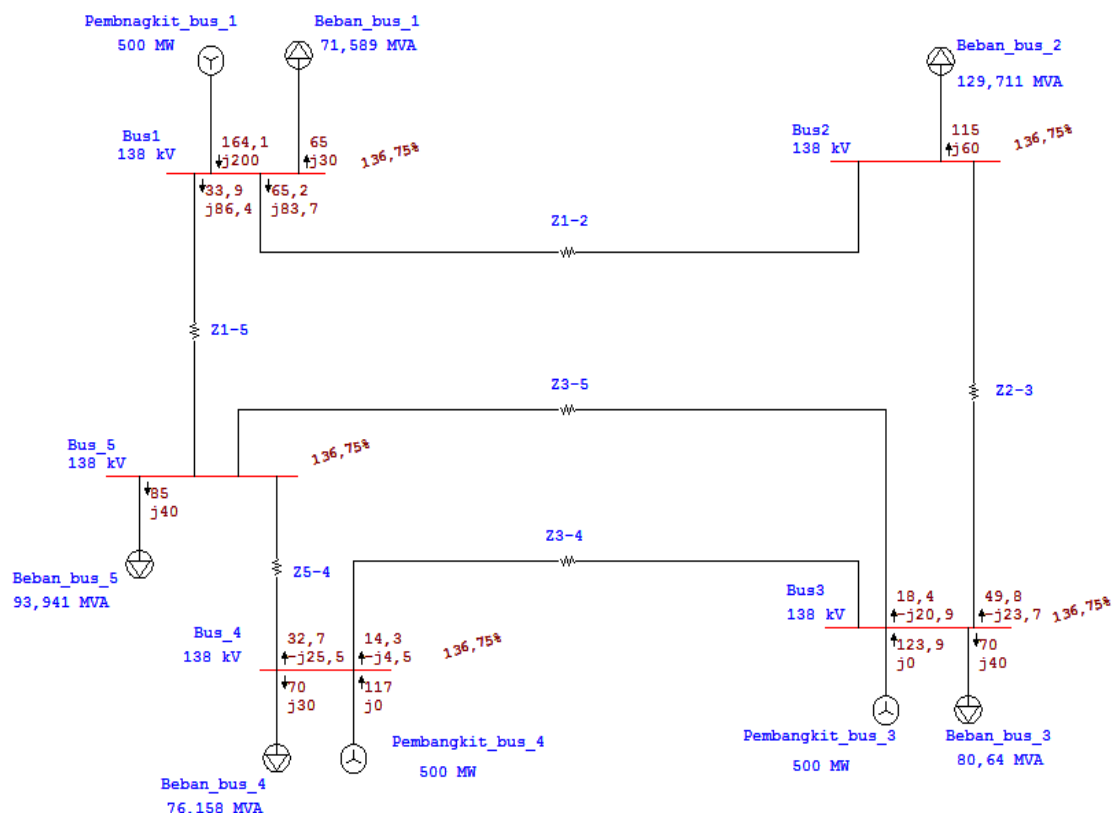
4.1.2 Kondisi 2 Saluran

Pada kondisi 2 nilai saluran transmisi bernilai seperti tabel 3.2.2. Untuk saluran kondisi 2 dengan nilai tersebut diasumsikan saluran bernilai nol, hal tersebut dikarenakan pada *software* ETAP 12.6 tidak bisa memasukkan tahanan atau resistansi yang bernilai nol. Untuk total kebutuhan beban dari setiap bus sebesar 405 MW. Diperoleh hasil optimasi pembebanan unit pembangkit sebagai berikut.

Tabel 4.2 Hasil OPF kondisi 2

Bus	Unit Pembangkit	Hasil OPF
1	Pembangkit_bus_1	164,1 MW
3	Pembangkit_bus_3	123,9 MW
4	Pembangkit_bus_4	117 MW

Setelah simulasi OPF ETAP dijalankan didapatkan hasil optimasi pembebanan pembangkit seperti tabel 4.1. Untuk pembangkit bus 1 didapatkan sebesar 164,1MW, pembangkit bus 3 sebesar 123,9 MW, dan pembangkit bus 4 sebesar 117 MW. Hasil ini menunjukkan kondisi paling optimal yang terhitung dari kondisi 2 melalui simulasi OPF pada ETAP 12.6. Berikut adalah tampilan hasil simulasi OPF ETAP kondisi 2 seperti yang ditunjukkan gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hasil simulasi kondisi 2 menggunakan ETAP 12.6

4.2 Validasi Hasil Simulasi Optimasi Pembebanan ETAP 12.6 Dengan Metode Iterasi Lamda dan Fmincon MATLAB

Perbandingan simulasi OPF ETAP 12.6 dengan metode iterasi lamda dan metode fmincon Matlab dilakukan untuk mengetahui keakuratan hasil simulasi yang didapat apakah sudah berjalan sesuai dan sama dengan perhitungan secara manual dan juga digunakan untuk mengetahui apakah simulasi OPF ETAP 12.6 memperhitungkan *losses* dalam mengoptimalkan pembebanan pembangkitan. Keberhasilan program diukur dari kemampuannya untuk menganalisis pendistribusian beban yang optimal sehingga daya yang dibangkitkan pada masing-masing unit memenuhi batas yang telah ditentukan dan juga energi yang dihemat dari pendistribusian beban mencapai nilai maksimum.

4.2.1 Perhitungan Optimasi Pembebanan Metode Iterasi Lamda

Perhitungan OPF metode iterasi lamda mengacu pada persamaan 2.15, dalam perhitungan metode ini *losses* saluran tidak diperhitungkan, sehingga total pembangkitan sama dengan total kebutuhan beban yaitu sebesar 405 MW. Dilakukan perhitungan metode ini untuk menganalisis hasil simulasi OPF ETAP 12.6 yang diperoleh.

Berikut adalah perhitungan metode iterasi lamda untuk permintaan daya 405 MW :

Mencari perubahan biaya bahan bakar ke -i (λ_i) dari fungsi biaya bahan bakar masing masing pembangkit

$$\lambda_1 = \frac{dF_1}{dP_1} = 0,18P_1 + 1,2$$

$$\lambda_2 = \frac{dF_2}{dP_2} = 0,24P_2 + 1$$

$$\lambda_3 = \frac{dF_3}{dP_3} = 0,22P_3 + 5$$

Kemudian mencari perubahan biaya bahan bakar total dengan menggunakan persamaan 2.14

$$\lambda = \frac{405 + \frac{1,2}{0,18} + \frac{1}{0,24} + \frac{5}{0,22}}{\frac{1}{0,18} + \frac{1}{0,24} + \frac{1}{0,22}}$$

$$\lambda = \frac{17367}{565} = 30,7380531$$

Setelah perubahan biaya bahan bakar didapatkan, selanjutnya adalah menghitung daya optimum setiap pembangkitan seperti persamaan 2.15.

$$P_1 = \frac{30,7380531 - 1,2}{0,18} = 164,100295 \text{ MW}$$

$$P_2 = \frac{30,7380531 - 1}{0,24} = 123,9085546 \text{ MW}$$

$$P_3 = \frac{30,7380531 - 5}{0,22} = 116,9911505 \text{ MW}$$

Tabel 4.3 Hasil OPF metode iterasi lamda

Bus	Unit Pembangkit	Hasil OPF
1	Pembangkit_bus_1	164,100295 MW
3	Pembangkit_bus_3	123,9085546 MW
4	Pembangkit_bus_4	116,9911505 MW

Setelah perhitungan OPF iterasi lamda, didapatkan hasil optimasi pembebanan pembangkit seperti tabel 4.3. Untuk pembangkit bus 1 didapatkan sebesar 164,1MW, pembangkit bus 3 sebesar 123,9 MW, dan pembangkit bus 4 sebesar 116,9 MW.

4.2.2 Perbandingan Hasil Simulasi OPF ETAP 12.6 Dengan Perhitungan OPF Metode Iterasi Lamda dan Fmincon MATLAB

Hasil pengujian dari simulasi OPF ETAP 12.6, metode Iterasi Lamda dan Fmincon dapat dilihat pada tabel 4.4, validasi dari perbandingan ini menjelaskan bahwa pada simulasi pengoptimalan pembebanan unit pembangkit software ETAP 12.6 memperhitungkan *losses* saluran. Dibuktikan dengan hasil dari simulasi kondisi 2

ETAP 12.6 yang *output* daya keluarannya sama dengan metode Iterasi Lamda dan Fmincon tanpa memperhitungkan *losses*.

Tabel 4.4 Perbandingan *output* daya OPF ETAP12.6, Iterasi Lamda, dan Fmincon

Unit pembangkit	Hasil <i>output</i> daya OPF			
	ETAP 12.6		Iterasi Lamda (MW)	Fmincon (MW)
	Kondisi 1 (MW)	Kondisi 2 (MW)		
Pembangkit_bus_1	165,6	164,1	164,100295	164.1003
Pembangkit_bus_3	125,8	123,9	123,9085546	123.9086
Pembangkit_bus_4	117	117	116,9911505	116.9911

4.3 Perbandingan Biaya Pembangkitan dari Metode Optimasi ETAP 12.6, Iterasi Lamda dan Fmincon

Biaya pembangkitan didapatkan dengan memasukan atau mensubtitusikan nilai *output* daya hasil optimasi ke persamaan fungsi biaya bahan bakar. Biaya pembangkitan yang diperoleh dalam *dollar/jam* (\$/jam) menggunakan metode optimasi ETAP 12.6, Iterasi Lamda dan Fmincon ditunjukkan oleh tabel 4.5. untuk ETAP 12.6 kondisi 1 didapatkan biaya pembangkitan sebesar 7867,4892 \$/jam, ETAP 12.6 kondisi 2 didapatkan biaya pembangkitan sebesar 7762,3481 \$/jam, metode Iterasi Lamda didapatkan biaya pembangkitan sebesar 7762,348086 \$/jam, dan Fmincon didapatkan biaya pembangkitan sebesar 7762,3 \$/jam.

Tabel 4.5 Perbandingan biaya pembangkitan setelah optimasi antara metode optimasi ETAP 12.6, Iterasi Lamda dan fmincon

Metode OPF	Harga biaya bahan bakar
ETAP 12.6 Kondisi 1	7867,4892 \$/jam
ETAP 12.6 Kondisi 2	7762,3481 \$/jam
Iterasi Lamda	7762,348086 \$/jam
Fmincon	7762,3 \$/jam

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan perhitungan optimasi pembebanan pada unit pembangkit menggunakan Software ETAP 12.6 ini didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Software ETAP 12.6 dapat menyelesaikan optimasi pembebanan unit pembangkit
2. Hasil OPF ETAP 12.6 berdasarkan 2 kondisi yang diuji didapatkan untuk kondisi 1 pembebanan masing masing unit, yaitu sebesar 165,6 MW, 125,8 MW, 177 MW. Sedangkan untuk kondisi 2 didapatkan pembebanan masing masing unit, yaitu 164,1 MW, 123,9 MW, 117 MW.
3. Hasil simulasi OPF ETAP12.6 kondisi 2 dengan metode Iterasi Lamda menunjukkan hasil sama yang mendekati, sehingga ini membuktikan bahwa simulasi OPF pada ETAP12.6 memperhitungkan rugi saluran pada perhitungannya.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Pembahasan mengenai optimasi pembebanan unit pembangkit dapat digunakan pada data sistem pembangkit lain atau yang lebih baru.
2. Pembahasan mengenai optimasi pembebanan unit pembangkit dapat digunakan pada metode lain untuk dibandingkan
3. penelitian selanjutnya dapat membahas OPF ETAP 12.6 dengan memepertimbangkan rugi rugi saluran

DAFTAR PUSTAKA

- D. Marsudi, *Pembangkitan Energi Listrik*, 2nd ed. Jakarta: Erlangga, 2011.
- W. D. Stevenson Jr, *Analisis Sistem Tenaga Listrik*, 4th ed. Bandung: Erlangga, 1994.
- Pertiwi, N.P., dkk. (2018). "Analisa Economic Dispatch Pada Unit Pembangkit Menggunakan Metode Iterasi Lambda Berdasarkan Base Point And Participation Factors". KITEKTRO: Jurnal Online Teknik Elektro. e-ISSN: 2252-7036 Vol.3No.22018: 24-29.
- Kanata Subhan. (2017). "Pembangkitan Ekonomis pada Unit Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Telaga Gorontalo Menggunakan Algoritma Genetika". Jurnal Rekayasa ElektriKA Vol. 13, No. 3
- Adrianti. (2010). "Penjadwalan Ekonomis Pembangkit Thermal Dengan Memperhitungkan Rugi Rugi Saluran Transmisi Menggunakan Metode Algoritma Genetik". ISSN : 0854 - 8471. No.33 Vol.1 Thn.XVII April 2010.
- R. Storn, K. Price, "Differential Evolution : A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces", Journal of Global Optimization 11:341±359, 1997G.
- Mahaputra, D.J., dkk. (2017). "Economic dan Emission dispatch pada Sistem Kelistrikan 500 kV Jawa-Bali Menggunakan Composite Generation Cost Function dengan Metode Cuckoo Optimization Algorithm". JURNAL TEKNIK ITS Vol. 6, No. 1.
- Tamin, A.F., dkk. (2018). " Optimisasi Penjadwalan Ekonomis pada Unit Pembangkit PLTG di PLTGU PT Indonesia Power Tambak Lorok Menggunakan Metode Differential Evolution Algorithm". SSN: 2302-9927, 231. VOL. 7, NO. 1, MARET 2018.
- Prasetya, J., dkk. (2019). "Penyelesaian *Economic Dispatch* Menggunakan Metode *Differential Evolution Algorithm* ".

