

TUGAS AKHIR - EE 184801

PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS *ENERGY STORAGE* OPTIMAL DENGAN MEMPERTIMBANGKAN PELEPASAN BEBAN

Muhammad Vito Hamza
NRP 07111640000154

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T. M.T.
Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

DEPATERMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



TUGAS AKHIR - EE 184801

PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS *ENERGY STORAGE* OPTIMAL DENGAN MEMPERTIMBANGKAN PELEPASAN BEBAN

Muhammad Vito Hamza
NRP 07111640000154

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T. M.T.
Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



FINAL PROJECT - EE 184801

**OPTIMAL ALLOCATION AND SIZING OF ENERGY
STORAGE CONSIDERING LOAD SHEDDING**

Muhammad Vito Hamza
NRP 07111640000154

Supervisor(s)
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T. M.T.
Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Penentuan Lokasi dan Kapasitas *Energy Storage* Optimal dengan Mempertimbangkan Pelepasan Beban”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2020



Muhammad Vito Hamza
NRP. 0711 16 4000 0154

**PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS *ENERGY*
STORAGE OPTIMAL DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN PELEPASAN BEBAN**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I



Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T. M.T.
NIP. 197411292000121001

**SURABAYA
JULI, 2020**

**PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS *ENERGY*
STORAGE OPTIMAL DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN PELEPASAN BEBAN**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.
NIP. 196509011991032002

**SURABAYA
JULI, 2020**

ABSTRAK

Sumber energi terbarukan merupakan salah satu sumber energi yang paling marak di sistem distribusi. Namun energi terbarukan memiliki karakteristik *intermittent* atau tidak dapat menghasilkan energi yang tetap setiap saat. Sehingga dibutuhkan penyimpanan energi untuk mengatasi kehilangan suplai energi. Selain sebagai solusi dari sifat *intermittent*, sistem *energy storage* (ES) dapat menjadi penopang daya pada sistem saat terjadi ketidakseimbangan daya. Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk menentukan lokasi serta kapasitas ES optimal sebagai penyokong daya sistem yang dapat meminimalisir biaya pembangkitan dan pelepasan beban. Digunakan metode *differential evolution algorithm* (DE) sebagai optimasi utama yang memiliki objektif biaya investasi baterai dan biaya operasional per-tahun serta *dynamic DC optimal power flow* (DDCOPF) sebagai sub-optimasi dengan objektif biaya pembangkitan dan pelepasan beban per-hari serta minimalisasi transaksi baterai pada sistem IEEE 30 bus.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

ABSTRACT

Renewable Energy (RE) is one of the technologies that popular among distribution system. Yet intermittent characteristic of RE is causing it to become unreliable for daily use. In order to make renewable energy such as PV become more reliable for the system, energy storage could be the solution to store unused energy created by PV and then supplying it to the system in time of needs. This final thesis aims to find the most optimum capacity and location of energy storage that create the lowest generating cost and load shedding cost. The simulation runs with differential evolution algorithm as the main optimization with the objective function of battery investment price and operational cost per-year and dynamic DC optimal power flow (DDCOPF) as the sub optimization with multi-objective function of operational cost and energy transaction in energy storage for IEEE 30 bus system.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang maha pengasih lagi maha penyayang karena memberikan kemampuan kepada penulis untuk menyelesaikan penelitian ini sebagai tugas akhir guna menyelesaikan jenjang studi S1 pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis berharap, tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca untuk penelitian selanjutnya dan dapat diterapkan secara nyata, khususnya bagi mahasiswa Teknik Elektro.

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini, penulis sangat berterima kasih atas segala dukungan, bantuan, bimbingan, dan doa yang telah diberikan kepada penulis. Teima kasih penulis ucapkan kepada:

1. Orang tua, kakak, dan seluruh keluarga yang telah memberikan seluruh cinta dan doanya.
2. Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I dan Dr. Ni Ketut Aryani, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan waktunya untuk mengarahkan dan membimbing selama perkuliahaan dan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
3. Prof. Ontoseno Penangsang, Prof. Adi Soeprijanto, Bapak Dimas Fajar Uman, Bapak Suyanto, serta dosen-dosen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak masukan dan pengetahuan kepada penulis.
4. Seluruh teman-teman penulis yang setia dengan *support*, kritik, serta saran untuk membantu penulis menyelesaikan tugas akhir. Asisten PSSSL, Bonek, MBVLBF, Himatektro SIGAP, SERASI, dan DINAKARA, e56, serta seluruh teman-teman yang namanya tidak bisa disebutkan satu persatu. Terimakasih juga kepada Diana Wijayanti yang semangat belajarnya menginspirasi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Metodelogi.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS <i>ENERGY STORAGE</i> OPTIMAL MEMPERTIMBANGKAN PELEPASAN BEBAN.....	5
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.2 Mikrogrid.....	6
2.2.1 <i>Photo Voltaic (PV)</i>	7
2.2.2 <i>Distributed Generator (DG)</i>	8
2.3 Energy Storage	9
2.4 Operasi Sistem Tenaga Listrik.....	10
2.4.1 <i>Optimal Power Flow</i>	12
2.4.2 DDCOF.....	13
2.4.3 <i>Weighted Sum Method</i>	15
2.5 Metode <i>Differential Evolution</i>	16

BAB 3 PENERAPAN *DIFFERENTIAL EVOLUTION* ALGORITHM DALAM MENENTUKAN KAPASITAS DAN LOKASI BATERAI OPTIMAL 18

3.1	Algoritma.....	18
3.2	Metode Penyelesaian ES optimal dengan DE.....	20
3.3	Permodelan Sistem IEEE 30 Bus	22
3.3.1	Data PV	23
3.3.2	Data Mikroturbin.....	23
3.3.3	Data Pembangkit Diesel	24
3.3.4	Data Grid PLN	25
3.3.5	Biaya Pelepasan Beban	26
3.3.6	<i>Energy Storage</i>	26
3.3.7	Kapasitas Saluran	27
3.4	Penyelesaian DDCOPF Multi objektif	28
3.4.1	Variabel Kontrol.....	31
3.4.2	Pembentukan Matriks A.....	32
3.4.3	Pembentukan Vektor lb dan ub	33
3.4.4	Pembentukan Matriks H dan Vektor g	34
3.4.5	Pembentukan Vektor x_{min} dan x_{max}	34

BAB 4 HASIL DAN ANALISA DATA 36

4.1	Kasus 1: Hybrid tanpa Baterai	36
4.1.1	Daya Terbangkit.....	36
4.1.2	Batasan Pembangkit dan Saluran	37
4.1.3	Profil Beban	38
4.1.4	Perhitungan Biaya	39
4.2	Kasus 2: Hybrid dengan Baterai	40
4.2.1	Peletakan dan Kapasitan Optimal <i>Energy Storage</i>	40
4.2.2	Daya Terbangkit.....	41

4.2.3	SOC & Energi Baterai.....	43
4.2.4	Batasan Pembangkit dan Saluran	44
4.2.5	Profil Beban	44
4.2.6	Perhitungan Biaya	45
4.3	Kasus 3: Isolated.....	46
4.3.1	Peletakan dan Kapasitan Optimal <i>Energy Storage</i>	46
4.3.2	Daya Terbangkit.....	48
4.3.3	SOC Baterai	50
4.3.4	Batasan Pembangkit dan Saluran	51
4.3.5	Profil Beban	52
4.3.6	Perhitungan Biaya	53
BAB 5 PENUTUP.....		55
5.1	Kesimpulan.....	55
5.2	Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA		56
LAMPIRAN.....		58

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem tenaga listrik konvensional	5
Gambar 2. 2 Sistem mikroturbin	7
Gambar 2. 3 Kriteria SEQ	11
Gambar 2. 4 Aliran energi dan ekonomi dari Sistem Tenaga Listrik	12
Gambar 3. 1 Proses pengerjaan tugas akhir	19
Gambar 3. 2 Profil beban sistem	21
Gambar 3. 3 Sistem IEEE 30 bus modifikasi	22
Gambar 3. 4 Kurva biaya mikroturbin	24
Gambar 3. 5 Kurva biaya pembangkit disel	25
Gambar 3. 6 Sistem 3 Bus	32
Gambar 4. 1 Daya Terbangkit Kasus 1	36
Gambar 4. 2 Profil beban kasus 1	38
Gambar 4. 3 Seminologi best cost	40
Gambar 4. 4 Daya Terbangkit Kasus 2	41
Gambar 4. 5 Pembangkitan PV dan Energy Storage	42
Gambar 4. 6 SOC baterai	43
Gambar 4. 7 Energi ES kasus 2	44
Gambar 4. 8 Profil Beban Kasus 2	45
Gambar 4. 9 Seminologi best cost kasus 3	47
Gambar 4. 10 Daya Terbangkit Kasus 3	48
Gambar 4. 11 Pembangkitan PV dan ES	49
Gambar 4. 12 SOC kasus 3	50
Gambar 4. 13 Energi ES pada sistem	51
Gambar 4. 14 Profil beban kasus 3	52

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Parameter DE yang digunakan.....	20
Tabel 3. 2 Konfigurasi baterai sebelum dilakukan optimasi	21
Tabel 3. 3 Letak bus pembangkit sistem mikrogrid	23
Tabel 3. 4 Data PV	23
Tabel 3. 5 Data Mikroturbin.....	24
Tabel 3. 6 Data pembangkit disel.....	24
Tabel 3. 7 Data kapasitas saluran	27
Tabel 4. 1 Kapasitas dan Letak Pembangkit pada Kasus 1	37
Tabel 4. 2 Pelepasan beban kasus 1	38
Tabel 4. 3 Peletakan dan Kapasitas Optimal ES Kasus 2.....	40
Tabel 4. 4 Peletakan dan Kapasitas Optimal Kasus 3	47
Tabel 4. 5 Profil beban kasus 3	52

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem ketenagalistrikan adalah sistem yang mengalirkan listrik dari pembangkitan menuju ke beban. Komposisi unit pembangkit tersebut semestinya diatur sedemikian rupa sehingga terjadi keseimbangan antara demand (kebutuhan beban) pada pusat - pusat beban dengan daya yang diproduksi oleh Power Plant (Pusat Pembangkit). Komposisi tersebut memiliki variasi yang beragam dan menghasilkan biaya yang berbeda-beda. Dengan demikian, dibutuhkan optimalisasi operasi sistem yang andal dan efisien. Optimal Power Flow merupakan metode untuk mendapatkan daya pembangkit yang paling ekonomis namun memenuhi keseimbangan daya dan mempertimbangkan batasan-batasan berupa regulasi tegangan bus serta kapasitas saluran pada keadaan steady state. Pada keadaan dimana keseimbangan daya tidak bisa terjaga, dilakukan pelepasan beban-beban tertentu untuk mengembalikan sistem ke keadaan seimbang.

Energy storage (ES) dapat menyimpan energi listrik yang dibangkitkan oleh sumber energi terbarukan sekaligus menyalurkan energi listrik ke beban tanpa menggunakan biaya bahan bakar. Hal ini menyebabkan ES menjadi salah satu solusi untuk meminimalisir biaya pembangkitan sistem. Penggunaan ES pada sistem dapat dioptimasi dari segi biaya dengan metode-metode diantaranya dynamic programming, linear programming, mixed-integer linear programming. Namun terdapat beberapa batasan yang harus diperhatikan yaitu efisiensi serta umur baterai. Salah satu faktor yang mempengaruhi umur baterai adalah kondisi charge dan discharge pada baterai.

Karena itu tugas akhir ini dimaksud untuk menentukan alokasi dan kapasitas baterai yang optimal dengan mempertimbangkan batasan dari baterai dan batasan operasi sistem. Sehingga dapat meminimalisir kemungkinan pelepasan beban yang ada.

1.2 Permasalahan

Sesuai dengan latar belakang di atas, maka perumusan masalah yang dibahas pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana menentukan lokasi dan kapasitas *energy storage* (ES) yang optimal menggunakan metode *differential evolution* (DE) pada sistem IEEE 30 Bus dengan mempertimbangkan kapasitas saluran, *ramp rate*, dan pelepasan beban.
2. Bagaimana mengintegrasikan metode *differential* dengan *dynamic DC optimal power flow* (DDCOPF).
3. Bagaimana hasil metode *differential evolution* (DE) dalam menentukan lokasi dan kapasitas *energy storage* (ES) yang optimal pada konfigurasi sistem tertentu.
4. Bagaimana hasil pelepasan beban pada sistem setelah adanya penentuan lokasi dan kapasitas *energy storage* (ES) yang optimal pada konfigurasi tertentu.

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah menemukan kapasitas dan lokasi baterai yang menghasilkan biaya per-tahun minimum sesuai dengan konfigurasi sistem yang ada.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengimplementasikan metode *differential evolution* sebagai *main optimization* dan DDCOPF sebagai *sub-optimization*.
2. Sistem kelistrikan yang digunakan adalah modifikasi sistem kelistrikan IEEE 30 Bus.
3. Tidak seluruh baterai dilakukan optimasi lokasi.
4. Rugi-rugi beban dan VAR diabaikan.
5. Beban dinamis selama 24 jam dengan selang waktu 1 jam.
6. Tegangan baterai konstan.
7. Tidak mengoptimalkan penempatan *distributed generator* (DG).
8. Tidak mengoptimalkan pelepasan beban.
9. Tidak terdapat prioritas bus untuk pelepasan beban dan penempatan baterai.

1.5 Metodologi

Metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur menggunakan publikasi ilmiah seperti paper, jurnal, serta tugas akhir sebelumnya. Materi-materi yang dipelajari terdapat pada ruang lingkup tugas akhir seperti aliran daya optimal, pelepasan beban, ES, dan DE.

2. Permodelan Sistem Menggunakan *Matpower*

Dilakukan permodelan sistem IEEE 30 bus menggunakan software Matlab Matpower. Matpower sudah menyediakan permodelan sampel IEEE 30 bus untuk kegunaan seperti economic dispatch (ED), OPF, dan DCOPF.

3. Penentuan Fungsi Matematis Sistem

Fungsi matematis yang telah diuraikan dimasukkan ke dalam bahasa pemrograman m yang kemudian akan diolah lebih lanjut pada saat proses simulasi. Fungsi tersebut meliputi OPF, pelepasan beban, ES, dan algoritma DE.

4. Penyusunan Matriks

Penyusunan matriks berbagai kondisi dibuat yaitu kondisi normal tanpa ES, kondisi normal dengan ES, kondisi ketika pelepasan beban tanpa ES, dan kondisi pelepasan beban dengan ES.

5. Proses Simulasi dan Analisis

Jika proses penyusunan matriks sudah valid, maka simulasi dapat dilanjutkan untuk menentukan biaya pembangkitan terkecil, pelepasan beban minimal, serta kapasitas dan lokasi ES. Bila proses simulasi berhasil, dapat dilakukan analisis dan evaluasi terhadap hasil yang didapatkan sehingga dapat dilakukan penarikan kesimpulan

6. Penyusunan Buku Tugas Akhir

Apabila seluruh proses pengambilan data dan analisis selesai, maka dilakukan penyusunan buku tugas sesuai dengan format yang ditentukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Dalam menyusun tugas akhir ini digunakan sistematika sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai latar belakang, permasalahan, batasan masalah, metode penelitian, tujuan, sistematika, dan relevansi tugas akhir.

BAB 2 PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS ENERGY STORAGE OPTIMAL MEMPERTIMBANGKAN PELEPASAN BEBAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai sistem tenaga listrik, mikrogrid, *energy storage*, kriteria SEQ, DDCOPF, *weighted sum method*, serta *differential evolution*.

BAB 3 PENERAPAN DIFFERENTIAL EVOLUTION DALAM PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS ENERGY STORAGE OPTIMAL DENGAN DYNAMIC DC OPTIMAL POWER FLOW UNTUK SISTEM IEEE 30 BUS

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai sistem IEEE 30 bus yang dimodifikasi menjadi sistem mikrogrid untuk menentukan kapasitas dan lokasi baterai optimal menggunakan *differential evolution algorithm* dan sub-optimalisasi DDCOPF yang mempertimbangkan pelepasan beban dan transaksi energi baterai.

BAB 4 VALIDASI, SIMULASI, DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dibahas hasil analisis dari simulasi *program* DE dan DDCOPF serta analisis biaya dari kasus-kasus yang ada.

BAB 5 PENUTUP

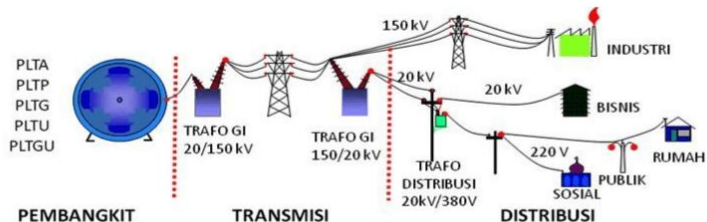
Pada bab ini dibahas kesimpulan dari hasil analisis pada bab sebelumnya. Selain itu, terdapat pula saran dan rekomendasi yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS *ENERGY STORAGE* OPTIMAL MEMPERTIMBANGKAN PELEPASAN BEBAN

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan jaringan terinterkoneksi dimana terdapat produksi daya listrik dari sistem pembangkitan, yang disalurkan melalui sistem transmisi, kemudian didistribusikan menuju ke beban melalui sistem distribusi.



Gambar 2. 1 Sistem tenaga listrik konvensional

Sistem pembangkitan konvensional mengubah energi mekanik menjadi listrik menggunakan generator sinkron. Generator sinkron bekerja dengan dua medan berputar: Rotor yang dieksitasi dengan arus DC dan belitan tiga fasa pada stator. Rotor pada generator terkopel dengan *prime-mover* yang biasanya berupa turbin uap atau turbin gas. Uap ataupun gas yang memutar turbin tersebut merupakan hasil dari pembakaran energi primer lain seperti batubara, gas bumi, nuklir, ataupun diesel [1]. Kemudian rotor yang berputar tersebut mengakibatkan medan pada belitan stator ikut berputar secara sinkron dan menghasilkan gaya gerak listrik (dalam satuan volt). Stator kemudian terhubung dengan terminal yang dapat mengalirkan arus listrik. Umumnya, pembangkit bekerja pada tegangan level menengah 1-35 kV dikarenakan alasan ekonomis. Keluaran dari pembangkit merupakan daya output dengan satuan Watt serta daya reaktif dengan

satuan VAR. Daya listrik tersebut yang akan dialirkan menuju konsumen melewati sistem interkoneksi transmisi dan distribusi.

Sebelum memasuki sistem transmisi, daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit dinaikkan dari tegangan menengah menuju tegangan tinggi pada gardu pembangkit dengan *step up transformer* (trafo). Hal ini dikarenakan aliran daya transmisi menggunakan level tegangan tinggi untuk mengurangi rugi-rugi daya. Sistem transmisi pada umumnya menggunakan kabel (bawah tanah atau laut) dan saluran udara (SUTT/SUTET). Saluran transmisi yang terinterkoneksi ke berbagai wilayah tersebut kemudian mengalirkan aliran listrik ke sistem distribusi masing-masing wilayah. Tidak jarang pula sistem transmisi yang masih di level tegangan tinggi dinaikkan ke level tegangan ekstra-tinggi (sampai 500 kV) untuk transmisi dengan jarak yang lebih jauh.

Setelah sampai di sistem distribusi aliran listrik kembali diturunkan ke tegangan menengah dengan *step down* trafo pada gardu induk dan diturunkan ke tegangan rendah dengan trafo distribusi. Hal ini dikarenakan gardu induk akan mengalirkan listrik langsung menuju konsumen baik bisnis, publik, ataupun rumah tangga. Dimana peralatan yang digunakan merupakan peralatan bertegangan rendah ataupun menengah.

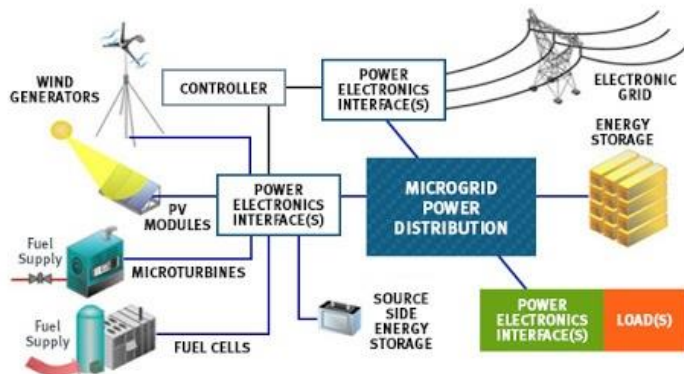
Sistem tenaga listrik dengan aliran daya listrik yang *linear* dari pembangkitan menuju distribusi tersebut merupakan sistem yang menggunakan *backbone* transmisi sebagai komponen utama penyaluran daya listrik. Dengan sistem distribusi dianggap sebagai penerima dari aliran daya listrik. Namun hal ini memberikan beberapa masalah diantaranya:

1. Masih dibutuhkannya cadangan pembangkit seperti *generating set* untuk mengatasi masalah pemadaman untuk konsumen sektor bisnis ataupun publik.
2. Losses transmisi yang makin besar seiring besarnya aliran daya
3. Ketergantungan yang besar terhadap sistem transmisi dimana pemutusan saluran mengakibatkan pemadaman pada suatu wilayah.

2.2 Mikrogrid

Saat ini jaringan distribusi memiliki beberapa peralatan seperti PV atap, *solar farm*, *wind turbine*, *diesel generator*, dan *energy*

storage. Peralatan tersebut pada awalnya digunakan hanya untuk individu tertentu. Namun dengan akses interkoneksi ke *grid*, peralatan tersebut dapat memberi kontribusi daya kepada sistem kelistrikan secara langsung ke titik-titik beban tertentu baik industri maupun perumahan. Kelompok penyuplai daya kecil namun dekat dengan beban inilah yang disebut *microgrid*.



Gambar 2. 2 Sistem mikroturbin

Karena letak yang dekat dengan beban, *microgrid* dapat memiliki metode operasi *hybrid*. Dimana suatu jaringan distribusi dapat bekerja secara *islanded* atau tidak disuplai oleh *grid* utama. Ataupun tersuplai dengan *grid* utama. Peralatan *microgrid* umumnya terhubung dengan peralatan elektronika daya sebelum dihubungkan dengan sistem. Hal ini dikarenakan beberapa dari peralatan tersebut memiliki level tegangan serta jenis arus (AC/DC) yang berbeda [2].

2.2.1 *Photo Voltaic (PV)*

PV merupakan energi terbarukan yang memanfaatkan sel surya untuk mengubah sinar matahari menjadi energi listrik. Faktor utama yang mempengaruhi daya PV adalah pengaruh dari iradiasi (cahaya langsung matahari) serta suhu pada panel. Setiap modul PV diuji pada *standard test condition* (STC) dengan iradiasi 1000 W/m^2 dan saat suhu sel 25° . Daya output PV dapat dihitung menggunakan persamaan 2.1 dan 2.2.

$$P_{pv} = \left(P_{STC} \times \frac{G_C}{G_{STC}} (1 - k(T_C - T_{STC})) \right) \times N_{PVs} \quad (2.1)$$

$$T_C = \left(T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20}{0.8} \right) S \right) \quad (2.2)$$

dengan,

P_{pv}	Daya keluaran PV
P_{STC}	Daya maksimal keluaran PV saat STC
G_C	Iradiasi aktual
G_{STC}	Iradiasi saat STC $1000 \frac{W}{m^2}$
k	Koefisien temperatur $\left(\% \frac{1}{^\circ C} \right)$
T_C	Temperatur aktual
T_{STC}	Temperatur saat STC (25 °C)
N_{PVs}	Jumlah modul PV seri
N_{PVp}	Jumlah modul PV paralel
T_{amb}	Temperatur lingkungan
$NOCT$	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>
S	$1 \frac{kW}{m^2}$

2.2.2 Distributed Generator (DG)

Distributed generator merupakan pembangkit kecil yang biasa ditempatkan di dekat beban ataupun pada beban. DG yang sering digunakan adalah mikroturbin dan pembangkit diesel. Mikroturbin merupakan pembangkit yang menggunakan turbin gas kecepatan tinggi dengan daya keluaran di bawah 500 kw. Namun secara komersial mikroturbin biasa memiliki daya keluaran berkisar antara 30-500 kW [3]. Pembangkit disel adalah pembangkit konvensional yang umum dijadikan pengganti dari *utility* secara komersial. Biaya operasi pembangkit DG dinyatakan sebagai fungsi daya keluaran seperti pembangkit termis pada umumnya. Yaitu:

$$F(P_{MT}) = a_{MT} P_{MT}^2 + b_{MT} P_{MT} + c_{MT} \quad (2.3)$$

$$F(P_D) = a_D P_D^2 + b_D P_D + c_D \quad (2.4)$$

dengan,	
$F(P_{MT})$	Fungsi biaya mikroturbin
A_{MT}, b_{MT}, c_{MT}	Koefisien biaya mikroturbin
P_{MT}	Daya keluaran mikroturbin
$F(P_D)$	Fungsi biaya diesel
A_D, b_D, c_D	Koefisien biaya diesel
P_D	Daya keluaran diesel

2.3 Energy Storage

Pada sistem tenaga listrik. Tidak semua pembangkit dapat memenuhi respon beban dalam hitungan jam. Hal ini dikarenakan karakteristik pembangkit termis yang memiliki *ramp rate* atau laju kenaikan daya. Pembangkit termis dengan *ramp rate* tercepat merupakan pembangkit gas (PLTG) namun pembangkit tersebut menggunakan bahan bakar gas yang membutuhkan biaya serta kurang ramah lingkungan. *Energy storage* (ES) dapat memenuhi kebutuhan beban dengan cepat tanpa bahan bakar ataupun emisi. Sehingga berpotensi menjadi pembangkit *load follower* ataupun *peaker* yang dapat memenuhi kebutuhan beban puncak.

Selain respon yang cepat, ES juga membantu pembangkit terbarukan seperti PLTS untuk menyimpan energi ketika matahari terik siang hari. Dan mengeluarkan energi pada waktu malam hari. Sehingga ES dapat menyelesaikan masalah *intermittent* dari pembangkit terbarukan. Dan dapat menambah kemampuan *microgrid* untuk bekerja secara *islanded*. ES juga dapat menjadi *backup power* sehingga menjaga beban-beban prioritas pada sistem distribusi tetap bekerja saat terdapat pemadaman pada *grid* [4].

Beberapa jenis teknologi ES antara lain adalah *flywheel*, SMES, CAES, *lead-acid*, dan Li-ion. Dari berbagai jenis ES yang ada saat ini, Li-ion memberikan solusi terbaik untuk daya dan energi output tinggi dengan *life cycle* diatas 5000 dan biaya yang lebih murah [5]. Rumus biaya investasi baterai adalah sebagai berikut [6].

$$\sum_{i=1}^N z_i C_i p \quad (2.5)$$

dimana,

z_i	konstanta bus-i (1/0)
C_i	kapasitas <i>energy storage</i> (Wh)
p	biaya <i>energy storage</i>

ES tidak menggunakan bahan bakar sehingga tidak menambah biaya bahan bakar. Namun perlu diperhatikan bahwa seperti baterai pada umumnya, ES memiliki *life cycle* yang terbatas. Sehingga umur ES merupakan salah satu hal yang penting untuk dioptimalkan. Salah satu faktor yang mempengaruhi umur ES adalah transaksi energi masuk dan keluar [7]. Transaksi energi masuk dan keluar ini dapat dimodelkan secara matematis dengan mengetahui kondisi *state of charge* (SOC) baterai. SOC dapat membatasi kapan baterai diperbolehkan menyuplai (*discharge*) dan terisi (*charge*) oleh sistem. Rumus energi baterai terdapat pada persamaan berikut:

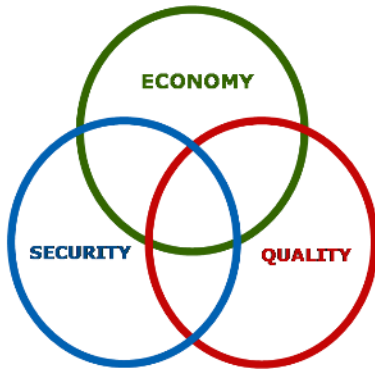
$$E_o = C_{bat} SOC V_{batt_{bus}} * 10^{-3} \quad (2.6)$$

dengan,

E_o	Energi baterai (kWh)
C_{bat}	Kapasitas baterai (Ah)
SOC	<i>State of charge</i> (%)
$V_{batt_{bus}}$	Tegangan pada bus baterai

2.4 Operasi Sistem Tenaga Listrik

Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik, terdapat trilema yang menjadi batasan serta referensi dalam pengoperasian yang baik dan benar yaitu *security, economics, quality* (SEQ). Dimana terdapat keterkaitan yang berbanding terbalik antara satu dan lainnya seperti pada Gambar 2. 3.



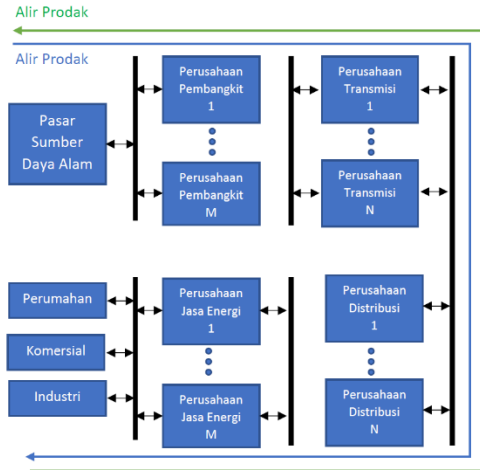
Gambar 2. 3 Kriteria SEQ

a. *Security* (keamanan)

Pada sistem tenaga listrik, keamanan yang dimaksud terbagi menjadi dua yaitu ketersediaan dan keandalan. Dimana ketersediaan yang dimaksud adalah adanya pasokan daya dari pembangkit yang dapat memenuhi kebutuhan beban semaksimal mungkin. Sedangkan keandalan adalah kemampuan peralatan seperti saluran dan trafo untuk mengatasi adanya permintaan beban lebih ataupun gangguan tanpa melewati batasan operasi tertentu. Keduanya memiliki keterkaitan dimana keandalan akan memperkecil ruang pasokan yang dapat diberikan pada unit pembangkit [8].

b. *Economics* (ekonomis)

Sistem tenaga listrik merupakan transaksi energi dan ekonomi antara produsen dengan konsumen yang terhubung secara *input* dan *output* menggunakan model *Leontief* seperti pada gambar 2.2 [9]. Hal ini dikarenakan sistem tenaga listrik merupakan serangkaian proses yang bergantung pada pasar energi primer seperti batubara, BBM, gas alam. Sedangkan konsumen listrik di Indonesia membayar tarif tetap (*fixed rate*). Hal ini mendorong penyedia listrik untuk terus menambah efisiensi biaya operasi sistem tenaga listrik agar dapat memperoleh keuntungan.



Gambar 2. 4 Aliran energi dan ekonomi dari Sistem Tenaga Listrik

c. *Quality* (kualitas)

Kualitas daya listrik merupakan salah satu hal yang harus dijaga dalam sistem tenaga listrik. Kualitas yang dimaksud adalah tegangan, frekuensi, serta bentuk gelombang suplai. Tegangan yang jatuh pada sisi konsumen terlalu rendah akan menyebabkan kerusakan peralatan seperti lampu redup, berkurangnya umur, serta rusaknya peralatan. Sedangkan frekuensi yang tidak sama pada sistem dapat menyebabkan pembangkit tidak bisa sinkron sehingga mengharuskan adanya pemutusan beban ataupun pembangkit [10].

2.4.1 *Optimal Power Flow*

Metode yang dikembangkan untuk memenuhi pembangkitan optimal pertama dilakukan dengan cara *economic dispatch* (ED). Namun metode ED tidak memperhatikan batasan-batasan yang ada pada sistem transmisi ataupun distribusi seperti batasan saluran, batasan trafo, ataupun drop tegangan. Selain itu, permodelan losses pada ED dianggap konstan [9]. Karena itu dilakukan optimasi aliran daya atau *optimal power flow* (OPF) yang merupakan ED dengan simulasi aliran daya sehingga optimasi dapat memperhatikan *losses* serta batasan yang ada pada saluran, trafo, ataupun bus. Perhitungan

fungsi objektif OPF terdapat pada persamaan 2.7. Dan persamaan aliran daya terdapat pada persamaan 2.8-2.10.

$$\min f(P)_1 = \sum_{i=1}^{N_{gen}} a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2.7)$$

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} + V_i V_j (g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad (2.8)$$

$$g_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (2.9)$$

$$b_{ij} = \frac{-x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (2.10)$$

Dikarenakan OPF merupakan *economic dispatch* yang menerapkan aliran daya. Maka didapatkan *equality constraint* yang harus dipenuhi yaitu *power balance* seperti pada persamaan 2.11 dan 2.12.

$$P_{net_i} + jQ_{net_i} = V_i \left(\sum_{k=1}^{N_{bus}} Y_{ik} V_k \right) \quad (2.11)$$

dengan,

P_{net_i}	Daya aktif jaringan ($P_{gen_i} - P_{load_i}$)
jQ_{net_i}	Daya reaktif jaringan
V_i	Tegangan di bus-i
Y_{ik}	Matriks admitansi bus-i ke bus-k

2.4.2 DDCOPF

Kebutuhan untuk melakukan optimasi pembangkitan serta aliran daya selama 24 jam penuh mendorong adanya simplifikasi perhitungan OPF dari aliran daya AC menjadi aliran daya DC dengan berasumsi:

1. Rasio resistansi r_{ij} terhadap reaktansi x_{ij} pada sistem sangat besar. Sehingga admitansi $g_{ij} \sim 0$
2. Nilai magnitude tegangan diasumsikan 1 p.u.
3. Perbedaan sudut tegangan sangat kecil

Sehingga persamaan 2.8 dapat diubah menjadi:

$$P_{ij} = \frac{1}{x_{ij}} (\delta_i - \delta_j) \quad (2.12)$$

Dengan batasan-batasan yaitu:

- *Equality Constraint*
Active power balance

$$P_{Li}^t - P_{Gi}^t + P_{INi}^t = 0$$

$$P_{IN}^t = \sum \frac{1}{x_{ij}} [\theta_i - \theta_j]$$

- *Inequality Constraint*
Kapasitas saluran transmisi

$$|P_{ij}^t| \leq P_{ij}$$

Kapasitas Pembangkit

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max}$$

Ramp rate

$$-\delta_i \leq P_{Gi}^{t+1} - P_{Gi}^t \leq \delta_i$$

DCOPF yang dihitung dengan domain waktu (jam) disebut disebut *dynamic* DCOPF (DDCOPF). Hasil perhitungan dari DCOPF dan ACOPF tidak begitu signifikan sehingga hasilnya dianggap valid [11]. Fungsi objektif dari DDCOPF terdapat pada 2.13.

$$\min f(P)_1 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{gen}} a_i P_{(i,t)}^2 + b_i P_{(i,t)} + c_{(i,t)} \quad (2.13)$$

2.4.3 *Weighted Sum Method*

DDCOPF umumnya mencari titik optimal dimana titik tersebut menunjukkan biaya operasional terendah dari seluruh kemungkinan yang diperbolehkan. Namun realitanya, titik optimal pada fungsi objektif biaya operasi belum tentu memberikan sistem yang optimal dalam aspek lain seperti *losses*, tegangan, pembebanan, dan umur peralatan. Karena itu optimasi pembangkitan dapat digabungkan dengan fungsi objektif lain untuk mendapatkan optimasi sistem yang mempertimbangkan segala aspek.

Weighted sum merupakan salah satu metode untuk menemukan titik optimum dari fungsi multi objektif. *Weighted sum* memberikan bobot (*weight*) untuk masing-masing fungsi objektif sehingga hasil optimasi yang didapatkan mempertimbangkan seluruh fungsi objektif. Fungsi objektif *weighted sum* terdapat pada persamaan 2.14.

$$\min\{F(P)\} = \min \left\{ \sum_{n=1}^k w_n S_n f(P)_n \right\} \quad (2.14)$$

dengan syarat

$$\sum_{n=1}^k w_n = 1 \quad (2.15)$$

Nilai S_n pada *weighted sum* merupakan pembagi agar fungsi objektif pertama dan kedua tidak memiliki rentang yang jauh. Terdapat berberapa metode untuk menentukan nilai S_n salah satunya adalah dengan mencari nilai optimal dari masing-masing fungsi objektif yaitu:

$$S_n = \frac{1}{f(P_{\text{optimal}})_n} \quad (2.16)$$

2.5 Metode *Differential Evolution*

Differential evolution (DE) pertama kali dipublikasikan sebagai metode optimasi *metaheuristic* yang bersifat stokastik dan bergantung pada populasi. Algoritma DE termasuk didalamnya adalah mutasi dan persilangan (*crossover*) yang membantu suatu individu berubah dan memperbaiki diri. Kemudian individu-individu tersebut akan dievaluasi berdasarkan suatu batasan-batasan kinerja yang menyebabkan seleksi terhadap populasi untuk generasi selanjutnya. Deskripsi singkat dari langkah-langkah yang terjadi pada DE adalah sebagai berikut [12].

a. Inisialisasi

DE dimulai dengan inisialisasi suatu populasi yang menjadi kandidat suatu solusi dengan tujuan menuju nilai yang acak dari suatu vektor penentu (decision vector) populasi. Nilai acak tersebut harus terdapat pada batas yang diizinkan yaitu batas minimum dan maksimum. Rumus inisialisasi yaitu:

$$X_{k,0}(j) = x_{\min}(j) + \text{rand}_{k,j}[0,1] \times [x_{\max}(j) - x_{\min}(j)] \quad (2.17)$$

dimana,

$\text{rand}_{k,j}$ Nilai acak antara 0 sampai 1
 j 1,2,...,D (D = Dimensi dari vektor penentu)

b. Mutasi

Pada tahap kedua, operator mutasi DE membuat suatu vektor donor sesuai dengan setiap individu populasi pada generasi yang ada.

$$Y_{k,G} = X_{Rk1,G} + \beta(X_{Rk2,G} - X_{Rk3,G}) \quad (2.18)$$

G menunjukkan generasi ke-G dari populasi. Strategi mutasi terpilih secara acak dan factor F merupakan parameter control positif untuk skala perbedaan vektor.

c. Persilangan

Vektor donor hasil mutasi kemudian membuat suatu generasi baru dengan vektor target secara binomial dengan ketentuan:

$$Z_{k,G}(j) = \begin{cases} Y_{k,G}(j), & \text{jika } rand_{k,j} [0,1] \leq CR \\ X_{k,G}(j), & \text{jika lainnya} \end{cases}$$

d. Evaluasi

Hasil generasi baru $Z_{k,G}$ kemudian dievaluasi dan dibandingkan dengan vektor *parent* $X_{k,G}$ dengan nilai *fitness function* dan batasan yang diberikan. Bila hasil dari generasi baru lebih optimum (pada kasus biaya, lebih kecil) dibandingkan dengan vektor *parent*, maka generasi baru akan menjadi vektor *parent* pada iterasi selanjutnya. Proses ini terus berulang dengan harapannya, tidak ada lagi perbedaan antara generasi baru dengan vektor *parent* (saturasi).

BAB 3

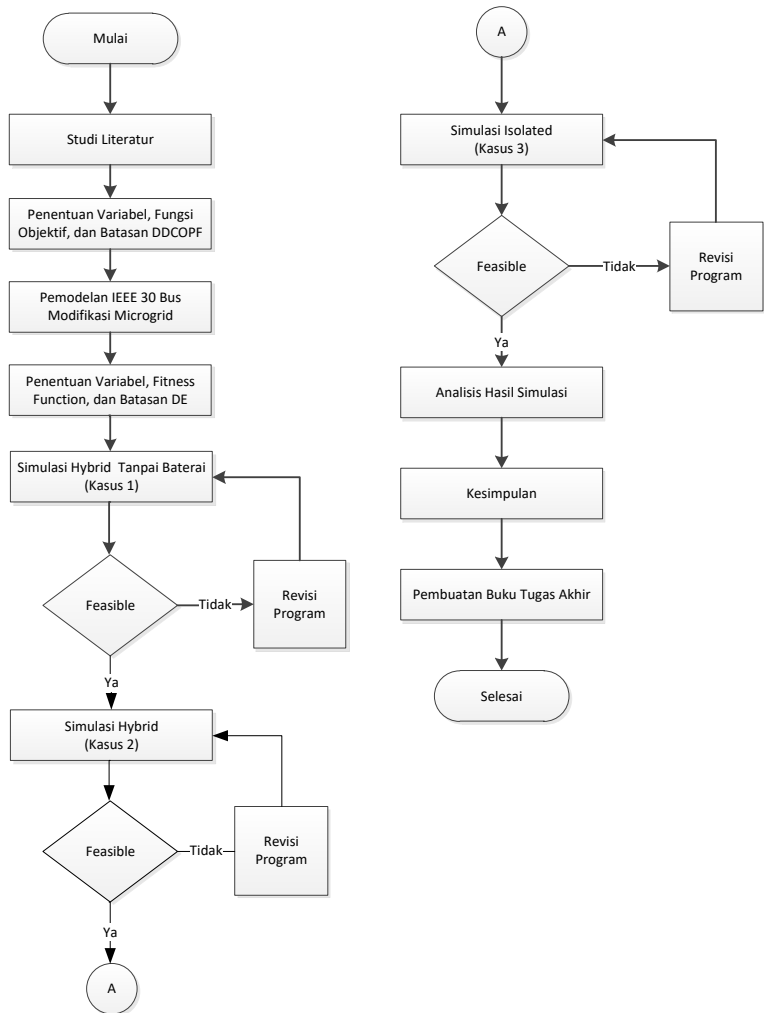
PENERAPAN *DIFFERENTIAL EVOLUTION* ALGORITHM DALAM MENENTUKAN KAPASITAS DAN LOKASI BATERAI OPTIMAL

3.1 Algoritma

Dalam pengerjaan tugas akhir ini digunakan *software* MATLAB dengan bahasa pemrograman m untuk mensimulasikan konfigurasi baterai yang menghasilkan biaya minimum pada kondisi tertentu. Dalam program yang digunakan, terdapat dua komponen optimisasi yaitu optimisasi utama untuk proses penentuan konfigurasi baterai. Serta sub-optimisasi untuk proses aliran daya dan *dispatch* pembangkit.

Metode yang digunakan pada optimisasi konfigurasi baterai (*main optimization*) adalah *differential evolution algorithm* yang kemudian konfigurasi tersebut akan dimasukkan ke dalam sub-optimisasi *dynamic DC optimal power flow* yang diselesaikan dengan metode *quadratic programming*.

Secara umum, proses pengerjaan tugas akhir ini dilakukan sesuai dengan alur pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Proses pengerjaan tugas akhir

3.2 Metode Penyelesaian ES optimal dengan DE

Dalam menentukan ES optimal digunakan biaya per tahun sebagai *fitness function* yang akan dievaluasi. Biaya per-tahun yang dimaksud adalah biaya operasi dari fungsi objektif 1 DDCCPF (persamaan 3.4) dan biaya investasi ES (persamaan 3.2). Nilai dari *fitness function* tersebut akan terus dicari nilai minimumnya sehingga didapatkan konfigurasi baterai yang menghasilkan biaya per-tahun paling rendah. *Fitness function* tersebut terdapat pada persamaan 3.1.

$$F(x) = Inv_{batt} + 365 * f(P)_1 \quad (3.1)$$

dengan,

Inv_{batt} Biaya investasi baterai per-tahun

$F(x)$ *Fitness function* (\$/tahun)

$f(P)_1$ Biaya operasi per-hari berdasarkan DDCCPF (\$/hari)

Dengan parameter *differential evolution* seperti pada **Tabel**

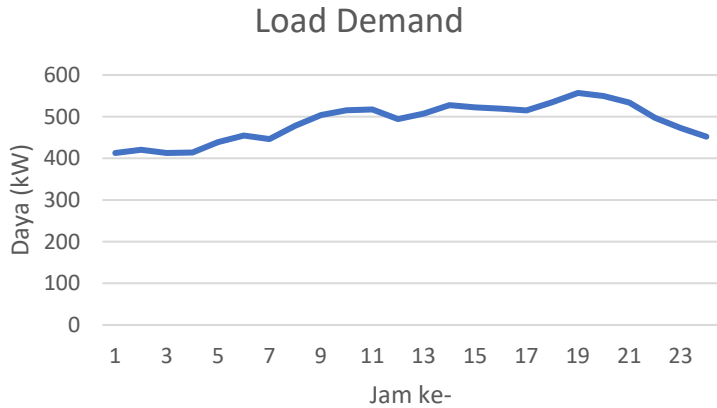
3. 1.

Tabel 3. 1 Parameter DE yang digunakan

Parameter	Jumlah
Jumlah Variabel	6
Populasi	50
Iterasi	1000
β_{max}	0,80
β_{min}	0,20
<i>Crossover Probability</i>	0,20

Dalam tugas akhir ini dilakukan dua simulasi kasus yaitu:

1. Kasus tanpa baterai (**kasus 1**). Dengan kasus tanpa baterai, maka hanya akan dilakukan perhitungan aliran daya optimal. Profil beban yang digunakan terdapat pada **Gambar 3. 2** berikut.



Gambar 3. 2 Profil beban sistem

2. Kasus baterai optimal (**kasus 2**) dilakukan untuk mencari nilai kapasitas dan alokasi baterai optimal sesuai dengan sistem mikrogrid kasus 1. Pada kasus 2, dilakukan pencarian 4 kapasitas baterai dengan 2 baterai pada letak bus yang sudah ditentukan (pada bus PV) dan dengan 2 baterai yang dicari lokasi optimalnya.

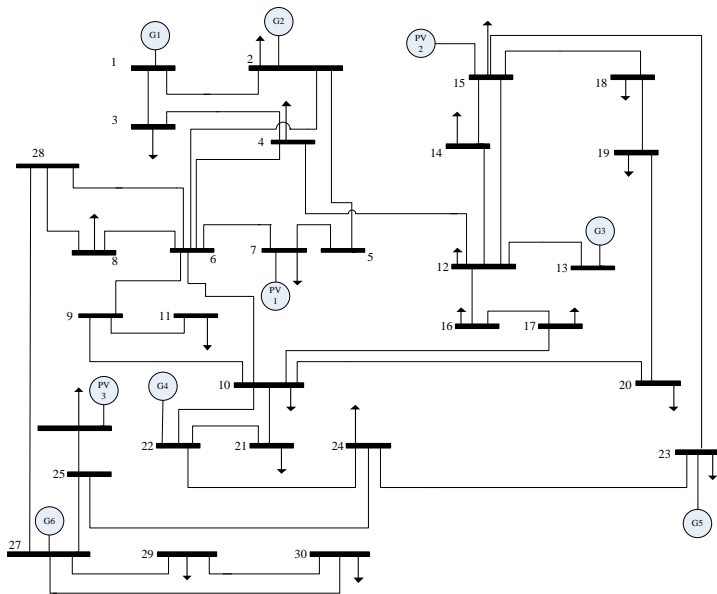
Tabel 3. 2 Konfigurasi baterai sebelum dilakukan optimasi

Bus	Baterai	Kapasitas Min (Ah)	Kapasitas Max (Ah)
7	Energy Storage 1 (ES – 1)	0	99999
15	Energy Storage 2 (ES – 1)	0	99999
?	Energy Storage 3 (ES – 1)	0	99999
?	Energy Storage 4 (ES – 4)	0	99999

3. Kasus *isolated* (**kasus 3**) dilakukan dengan menggunakan sistem mikrogrid dan konfigurasi baterai pada kasus 2 namun

dengan menganggap grid PLN tidak memberikan suplai daya. Sehingga sistem mikrogrid hanya bekerja dengan pembangkit lokal, PV, dan ES.

3.3 Permodelan Sistem IEEE 30 Bus



Gambar 3. 3 Sistem IEEE 30 bus modifikasi

Sistem yang digunakan adalah sistem IEEE 30 bus dengan modifikasi sehingga menyerupai sistem mikrogrid. Terdapat tiga jenis pembangkit yang digunakan yaitu pembangkit disel, mikroturbin, dan PV. Dengan konfigurasi seperti pada **Tabel 3. 3**.

Tabel 3. 3 Letak pembangkit pada sistem IEEE 30 Bus

Bus	Pembangkit
1	Grid PLN
2	Mikroturbin 1 (MT-1)
27	Mikroturbin 2 (MT-2)
7	PV – 1
15	PV – 2
26	PV – 3
13	Diesel 1 (Die – 1)
22	Diesel 2 (Die – 2)
23	Diesel 3 (Die – 3)

3.3.1 Data PV

Dalam tugas akhir ini digunakan modul sel surya yang terpasang pada Gedung AJ Teknik Elektro ITS dengan model *polycrystalline* sebanyak 8 unit 80 watt dan model *monocrystalline* sebanyak 4 unit 65 watt. Daya keluaran PV dapat dilihat pada tabel

Tabel 3. 4 Data PV

Jam	P _{out} (watt)	Jam	P _{out} (watt)	Jam	P _{out} (watt)
01	0	09	432	17	72
02	0	10	540	18	12
03	0	11	720	19	0
04	0	12	732	20	0
05	0	13	708	21	0
06	12	14	636	22	0
07	60	15	516	23	0
08	84	16	324	24	0

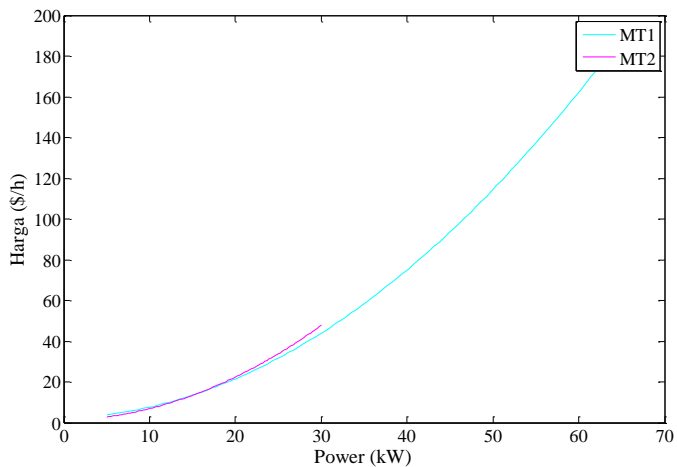
Rangkaian PV disusun 120 unit pada rangkaian bus 7, 100 unit pada rangkaian bus 15, 80 unit pada rangkaian bus 26.

3.3.2 Data Mikroturbin

Data mikroturbin yang terdapat pada **Tabel 3. 5**.

Tabel 3. 5 Data Mikroturbin

Bus	Kapasitas	Koefisien Biaya Pembangkitan		
		a	b	c
2	65	0.0425	0.12	2.13
27	30	0.049	0.08	1.2



Gambar 3. 4 Kurva biaya mikroturbin

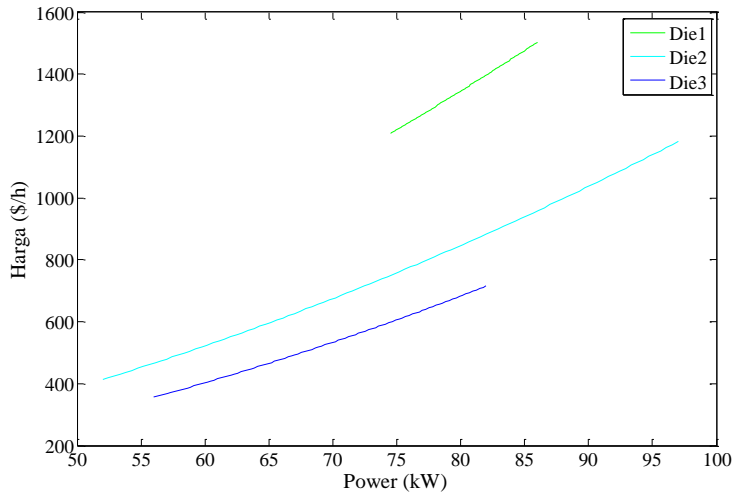
3.3.3 Data Pembangkit Diesel

Data pembangkit disel yang terdapat pada **Tabel 3. 6**.

Tabel 3. 6 Data pembangkit disel

Bus	P_{\min}	P_{\max}	Koefisien Biaya Pembangkitan		
			a	b	c
13	74.5	86	0.11	8	1.52

22	52	97	0.0945	3	1.71
23	56	82	0.0915	1.2	1.45



Gambar 3. 5 Kurva biaya pembangkit diesel

3.3.4 Data Grid PLN

PT. PLN (Persero) merupakan perusahaan yang melayani jasa kelistrikan di Indonesia. PLN diasumsikan sebagai daya pembangkitan yang terbatas sebesar 100 kW sesuai dengan adanya kapasitas trafo dari jaringan transmisi PLN menuju ke distribusi sistem. PLN memiliki perhitungan fungsi biaya linear sesuai dengan tarif tenaga listrik yang jika dimodelkan dalam fungsi biaya:

$$\begin{aligned}
 \text{Harga listrik per kWh (TTL)} &: \text{Rp}1.467,00/\text{kWh} \\
 \text{Kurs USD ke IDR (K)} &: \text{Rp}15.534,00 \\
 \text{Konstanta biaya (k)} &: \frac{TTL}{K} \text{ (\$/kWh)}
 \end{aligned}$$

3.3.5 Biaya Pelepasan Beban

Pelepasan beban diasumsikan menyebabkan kerugian dimana terdapat kompensasi listrik selama jam beban dipadamkan. Sehingga konstanta biaya pelepasan beban memakai konstanta biaya grid PLN. Dengan model matematis sebagai berikut:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N k \Delta P_{Li}^t \quad (3.2)$$

dimana,

T	total jam (24 jam)
t	lama pelepasan beban
i	bus beban terlepas
N	jumlah bus
k	konstanta biaya (\$/kWh)
P_{Li}^t	beban terlepas bus-i pada jam-t

3.3.6 Energy Storage

Digunakan *energy storage* berjenis baterai LiFePO4 dengan karakteristik 12 V, arus *charging* 125 A, arus *discharging* 180 A. Baterai diasumsikan dijalankan seri 6 buah sehingga voltase terminal menjadi 72 V. Dengan SOC awal baterai sebesar 80%.

Biaya investasi baterai per-tahun dihitung menggunakan *Equivalent Uniform Annual Cost* dengan rumus sebagai berikut [13]:

$$Inv_{batt} = \frac{Price_{batt}}{1000} Cap_{batt} V_{batt} \left[\frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \right] \quad (3.3)$$

dengan,

Inv_{batt}	biaya investasi tahunan baterai (\$/tahun)
$Price_{batt}$	harga baterai (209 \$/kWh) [14]
Cap_{batt}	kapasitas baterai (Ah)
V_{batt}	tegangan baterai
i	suku bunga (%)
n	lama operasi baterai (tahun)

Sehingga dengan asumsi suku bunga sebesar 5% dan operasi baterai selama 10 tahun. Maka persamaan 3.3 menjadi:

$$Inv_{batt} = \frac{Price_{batt}}{1000} Cap_{batt} V_{batt} 0.1295 \quad (3.4)$$

3.3.7 Kapasitas Saluran

Data kapasitas saluran terdapat pada **Tabel 3. 7**.

Tabel 3. 7 Data kapasitas saluran

Dari	Menuju	Kapasitas
1	2	130
1	3	32
2	4	16
3	4	32
2	5	32
2	6	32
4	6	90
5	7	32
6	7	70
6	8	90
6	9	65
6	10	32
9	11	16
9	10	65
4	12	70
12	13	90
12	14	16
12	15	65
12	16	32
14	15	32
16	17	16
15	18	70

18	19	65
19	20	16
10	20	32
10	17	65
10	21	65
10	22	65
21	22	90
15	23	90
22	24	32
23	24	70
24	25	65
25	26	65
25	27	65
28	27	16
27	29	32
27	30	32
29	30	32
8	28	16
9	28	16

3.4 Penyelesaian DDCOPF Multi objektif

Dalam tugas akhir ini terdapat dua optimasi yang dilakukan dengan metode berbeda. Optimasi utama diselesaikan menggunakan metode *differential evolution*. Dan optimasi kedua yang merupakan sub-optimasi dari optimasi pertama diselesaikan menggunakan DDCOPF multiobjektif yang diselesaikan dengan metode *weighted sum* pada persamaan 3.5.

$$\min\{F(P)\} = \min \left\{ \sum_{n=1}^2 w_n s_n f(P)_n \right\} \quad (3.5)$$

Fungsi objektif pertama dari sub-optimasi merupakan persamaan biaya operasi per-hari seperti yang tertera pada persamaan 3.6.

$$f(P)_1 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{gen} a_i P_{(i,t)}^2 + b_i P_{(i,t)} + c_{(i,t)} + \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N P_{Li}^t \quad (3.6)$$

Batasan sistem yang dipertimbangkan pada $f(P)_1$ adalah sebagai berikut:

- *Equality Constraint*
Active power balance

$$P_{Li}^t - P_{Gi}^t + P_{IN i}^t = 0$$

$$P_{IN}^t = \sum \frac{1}{x_{ij}} [\theta_i - \theta_j]$$

- *Inequality Constraint*
Kapasitas saluran transmisi

$$|P_{ij}^t| \leq P_{ij}$$

Kapasitas Pembangkit

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max}$$

Ramp rate

$$-\delta_i \leq P_{Gi}^{t+1} - P_{Gi}^t \leq \delta_i$$

Persamaan 3.6 merupakan salah satu komponen yang dipakai sebagai *fitness function* pada optimasi utama. Sedangkan fungsi objektif kedua dari sub-optimasi merupakan persamaan energi baterai seperti yang tertera pada persamaan 3.7.

$$f(P)_2 = \sum_{j=1}^4 \sqrt{\sum_{t=1}^{24} (P_j^t)^2} \quad (3.7)$$

Batasan sistem yang dipertimbangkan pada $f(P)_2$ adalah sebagai berikut:

- Kapasitas baterai

$$-P_{ch \max} \leq P_{ES} \leq P_{dch \max}$$

Dengan nilai daya charging maksimum bergantung kepada total kapasitas ES (Ah), nilai rating capacity (Cap) dan *max charging current* satu unit ES (I_{ch}), serta nilai tegangan catu dari ES (V_{ES}).

$$P_{ch \max} = \frac{Ah}{Cap} I_{ch} V_{ES}$$

- *State of charge*

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max}$$

- Kapasitas Energi

$$E_{ES \min} \leq E_0 - \sum_{t=1}^T E_{ES}(t) \leq E_{ES \max}$$

Dikarenakan DDCOPF adalah penyelesaian fungsi objektif berbentuk persamaan kuadrat. Metode *quadratic programming* (QP) dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah DDCOPF. Fungsi objektif dari QP adalah sebagai berikut:

$$\text{Min } f(x) = \frac{1}{2}x^T Hx + gx \quad (3.8)$$

$$A_{eq}x = b_{eq} \quad (3.9)$$

$$lb \leq Ax \leq ub \quad (3.10)$$

$$lb = ub = b_{eq} \quad (3.10)$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (3.11)$$

Perhitungan QP akan menentukan nilai x (variabel kontrol) sehingga menghasilkan fungsi objektif dengan nilai minimum.

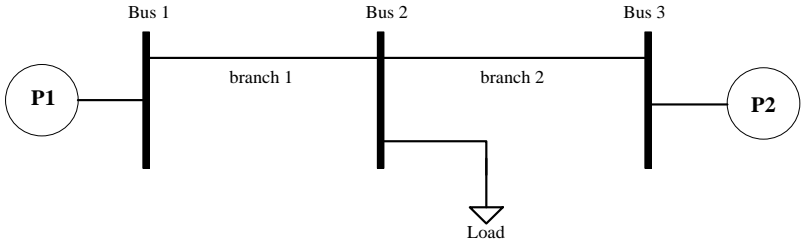
3.4.1 Variabel Kontrol

Merupakan variabel yang dilakukan optimasi. Variabel kontrol dalam DCOPF adalah sudut tegangan, daya pembangkit, serta daya beban. Pada QP, variabel kontrol DCOPF tersebut diterjemahkan dalam bentuk matriks x .

$$x = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_{nb} \\ P_{G_i} \\ \vdots \\ P_{G_{ng}} \\ P_{L_i} \\ \vdots \\ P_{L_{nlb}} \end{bmatrix}$$

3.4.2 Pembentukan Matriks A

Pada persamaan 3.8 - 3.10 koefisien A merupakan matriks dengan batasan *equality constraint* (A_{eq}) ataupun *inequality constraint* (A_{ineq}). Sebagai contoh untuk sistem 3 bus seperti pada gambar 3.2. Dengan P2 sebagai *energy storage*.



Gambar 3. 6 Sistem 3 Bus

Maka bentuk matriks A adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} A_{eq} \\ A_{ineq} \end{bmatrix}$$

Dengan susunan matriks A sebagai berikut:

$$A = \begin{array}{c} \begin{array}{c} A_{eq}^1 \\ A_{ineq}^1 \text{ branch} \end{array} \begin{array}{c} 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \end{array} \begin{array}{c} A_{eq}^2 \\ A_{ineq}^2 \text{ branch} \end{array} \end{array}$$

<i>Ramp Rate</i>
<i>Battery Energy Limit</i>

Dimana:

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} y_{11} & 0 & -y_{13} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & y_{22} & -y_{23} & 0 & -1 & 0 \\ -y_{13} & -y_{23} & y_{33} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{ineq \text{ branch}} = \begin{bmatrix} y_{13} & 0 & -y_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_{23} & -y_{23} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{ineq \text{ RR}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$\underbrace{\hspace{15em}}$
 Level t

$\underbrace{\hspace{15em}}$
 Level $t+1$

$$A_{ineq \text{ batt limit}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$\underbrace{\hspace{15em}}$
 Level t

$\underbrace{\hspace{15em}}$
 Level $t+1$

3.4.3 Pembentukan Vektor lb dan ub

Vektor lb dan ub pada QP merupakan matriks kolom yang menandakan batas atas dan batas bawah dari sistem sepanjang level (waktu). Panjang vektor kolom dari matriks lb dan ub sama dengan panjang baris matriks A.

$$lb = \left[\begin{array}{c} 0^1 \\ 0^1 \\ P_{L3}^1 \\ -P_{13}^1 \\ -P_{23}^1 \\ 0^2 \\ 0^2 \\ P_{L3}^2 \\ -P_{13}^2 \\ -P_{23}^2 \\ -RR^{12} \\ E_{min} - E_0 \\ E_{min} - E_0 \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \text{Power balance at level} \\ 1 \\ \text{Branch capacity at} \\ \text{level 1} \\ \text{Power balance at} \\ \text{level 2} \\ \text{Branch capacity at} \\ \text{level 2} \\ \text{Ramp rate level 1-2} \\ \text{Energy limit} \end{array} \right\} \left[\begin{array}{c} 0^1 \\ 0^1 \\ P_{L3}^1 \\ P_{13}^1 \\ P_{23}^1 \\ 0^2 \\ 0^2 \\ P_{L3}^2 \\ P_{13}^2 \\ P_{23}^2 \\ RR^{12} \\ E_{max} - E_0 \\ E_{max} - E_0 \end{array} \right] = ub$$

3.4.4 Pembentukan Matriks H dan Vektor g

Matriks H dan g merupakan matriks yang menandakan koefisien dari variabel kontrol fungsi objektif. Dimana H menandakan orde dua (koefisien a fungsi biaya pembangkitan) dan g menandakan orde satu (koefisien b fungsi biaya pembangkitan).

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_1^1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_2^1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$g = [0 \quad 0 \quad 0 \quad b_1^1 \quad b_2^1 \quad 0]$$

3.4.5 Pembentukan Vektor x_{min} dan x_{max}

Vektor x_{min} dan x_{max} merupakan batas atas dan batas bawah dari variabel kontrol. Pada DCOPF, variabel kontrol berupa sudut tegangan, daya terbangkit generator (termasuk *energy storage*), dan daya pada *load bus*. Sehingga vektor x_{min} dan x_{max} akan berisi batas atas dan bawah variabel kontrol tersebut.

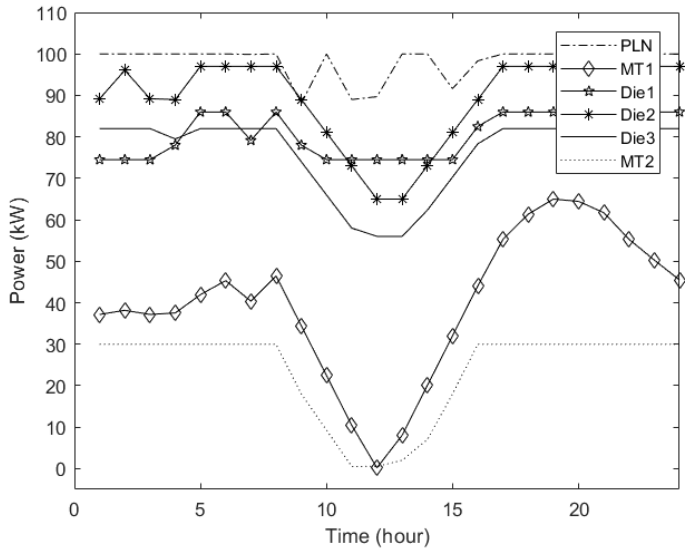
$$\begin{aligned}
\mathbf{x} &= \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ p_{\text{gen}} \\ p_{\text{ES}} \\ p_{\text{load}} \end{bmatrix} & \mathbf{x}_{\text{min}} &= \begin{bmatrix} -\text{inf} \\ -\text{inf} \\ -\text{inf} \\ p_{\text{gen min}} \\ p_{\text{ES min}} \\ 0 \end{bmatrix} & \mathbf{x}_{\text{max}} &= \begin{bmatrix} \text{inf} \\ \text{inf} \\ \text{inf} \\ p_{\text{gen max}} \\ p_{\text{ES max}} \\ p_{\text{load}} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

BAB 4

HASIL DAN ANALISA DATA

4.1 Kasus 1: Hybrid tanpa Baterai

4.1.1 Daya Terbangkit



Gambar 4. 1 Daya Terbangkit Kasus 1

Dari **Gambar 4. 1**, pembangkitan mikroturbin, disel, dan grid PLN mengalami penurunan pada saat jam PV aktif (jam 8 - 17). Mikroturbin 1 (MT-1) berada dalam kapasitas maksimum saat jam ke-19 (65 kW). Sedangkan MT-2 berada pada kapasitas maksimum (30 kW) dari jam ke-1 sampai 24 kecuali pada jam PV masuk ke sistem. Hal ini mengindikasikan MT-2 merupakan opsi pembangkit yang ekonomis.

Pembangkit Disel 1 (Die1) berada pada kapasitas minimum pada saat jam ke-1 dan ketika PV aktif. Hal ini mengindikasikan Die1 kurang ekonomis dalam pembangkitan. Dikarenakan fungsi biaya dengan konstanta a dan b yang jauh lebih besar daripada Die2 dan Die3. Dengan Die3 berjalan dengan kapasitas maksimum (82 kW)

pada jam di luar PV. Sistem juga memanfaatkan grid PLN secara maksimal (100 kW) saat jam di luar PV. Hal ini dikarenakan grid PLN merupakan salah satu opsi pembangkitan yang ekonomis. Dengan fungsi biaya sebesar 0.11\$/kWh. **Tabel 4. 1** memperlihatkan kapasitas dan letak bus pembangkit.

Tabel 4. 1 Kapasitas dan Letak Pembangkit pada Kasus 1

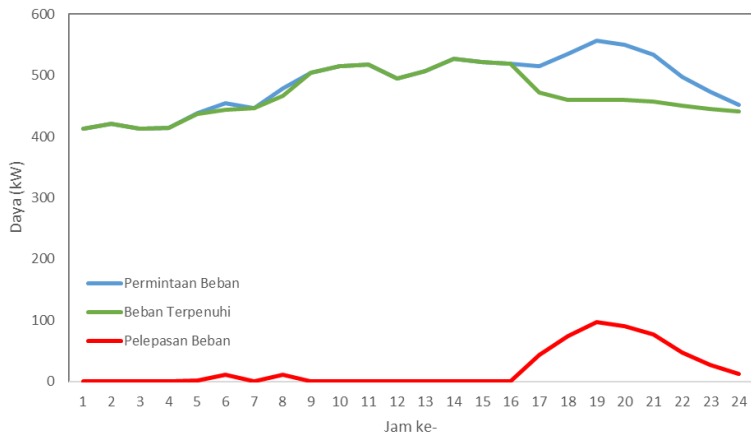
Bus	Pembangkit	Kapasitas (kW)
1	Grid PLN	100,00
2	Mikroturbin 1 (MT-1)	65,00
27	Mikroturbin 2 (MT-2)	30,00
13	Diesel 1 (Die – 1)	86,00
22	Diesel 2 (Die – 2)	97,00
23	Diesel 3 (Die – 3)	82,00
Total Kapasitas (kW)		460,00

Pada PV daya dikeluarkan tergantung oleh variabel bebas berupa cahaya (*illuminance*). Sehingga perhitungan kapasitas daya didasarkan pada daya puncak yang dapat dikeluarkan PV sesuai kondisi cahaya matahari yang ada.

4.1.2 Batasan Pembangkit dan Saluran

Dari hasil kasus 1, daya yang dibangkitkan tiap jam selama 24 jam tidak melanggar batasan minimum atau maksimum pembangkit dan pembangkit mampu mengatur naik turunnya daya pada batasan *ramp rate* yang diizinkan. Selain itu, daya yang mengalir tidak melebihi kapasitas saluran yang diizinkan. (terlampir)

4.1.3 Profil Beban



Gambar 4. 2 Profil beban kasus 1

Dari gambar 4.2, didapatkan bahwa sistem tidak dapat memenuhi permintaan beban dengan batasan-batasan yang diberikan. Sehingga harus dilakukan pelepasan beban. Pelepasan beban signifikan terjadi ketika di atas jam ke-16. Selain karena meningkatnya permintaan beban, pelepasan beban juga terjadi dikarenakan jam tersebut tidak lagi terdapat PV yang dapat menopang beban. Dan dikarenakan kapasitas maksimum pembangkit tidak bisa menopang beban puncak saat malam hari. Kapasitas maksimum pembangkit mikroturbin, diesel, dan grid PLN adalah 460 kW. Sedangkan permintaan beban puncak adalah 556,96 kW (terlampir). Pelepasan beban selama 24 jam terdapat pada **Tabel 4. 2**.

Tabel 4. 2 Pelepasan beban kasus 1

Jam	1	2	3	4	5	6
Permintaan Beban	412,87	420,71	412,87	414,03	439,00	454,69
Beban Terpenuhi	412,87	420,71	412,87	414,03	436,95	443,94
Pelepasan Beban	0,00	0,00	0,00	0,00	2,05	10,75
Jam	7	8	9	10	11	12

Permintaan Beban	446,4 0	478,1 0	503,7 0	515,2 6	517,3 3	494,2 1
Beban Terpenuhi	446,4 0	466,6 5	503,7 0	515,2 6	517,3 3	494,2 1
Pelepasan Beban	0,00	11,46	0,00	0,00	0,00	0,00
Jam	13	14	15	16	17	18
Permintaan Beban	507,4 2	527,6 5	522,2 8	519,3 9	514,8 5	534,6 7
Beban Terpenuhi	507,4 2	527,6 5	522,2 8	519,3 9	471,8 8	459,9 5
Pelepasan Beban	0,00	0,00	0,00	0,00	42,97	74,71
Jam	19	20	21	22	23	24
Permintaan Beban	556,9 6	549,5 3	533,8 4	497,5 1	472,7 4	452,0 9
Beban Terpenuhi	460,0 0	459,4 5	456,7 0	450,3 0	445,2 9	440,5 1
Pelepasan Beban	96,96	90,08	77,14	47,21	27,44	11,58
Total						
Permintaan Beban	11698,09 kWh					
Beban Terpenuhi	11205,74 kWh					
Pelepasan Beban	492,35 kWh					

4.1.4 Perhitungan Biaya

Dari konfigurasi pembangkitan tanpa baterai, didapatkan perhitungan biaya per-tahun seperti berikut:

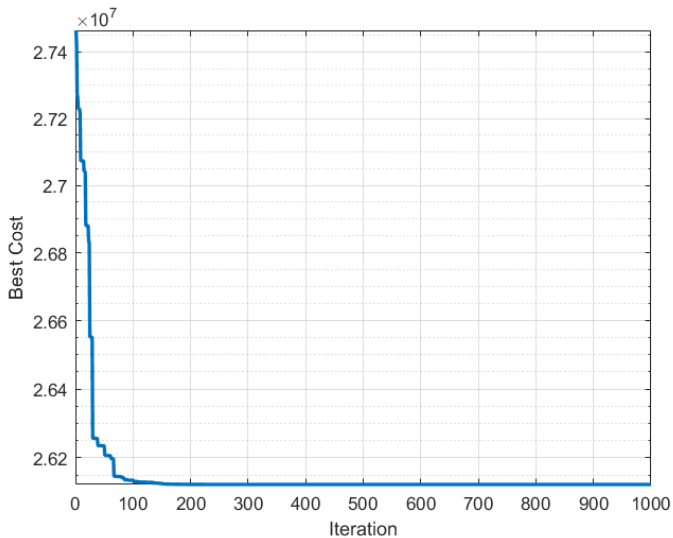
Biaya Operasi Mikrogrid

Biaya Pembangkitan	\$75.894	/hari
Biaya Shedding	\$46	/hari
Biaya Operasi	\$75.940	/hari
Total Biaya	\$27.718.172	/tahun

4.2 Kasus 2: Hybrid dengan Baterai

4.2.1 Peletakan dan Kapasitas Optimal *Energy Storage*

Selama *running*, algoritma DE terus mencari biaya per-tahun paling sedikit (*best cost*) sampai di titik saturasi yang menandakan bahwa tidak ada lagi konfigurasi baterai yang lebih optimal dari titik tersebut (*best solution*). Rekam jejak iterasi dan *best cost* setiap iterasinya terdapat pada Gambar 4. 3.



Gambar 4. 3 Seminologi best cost

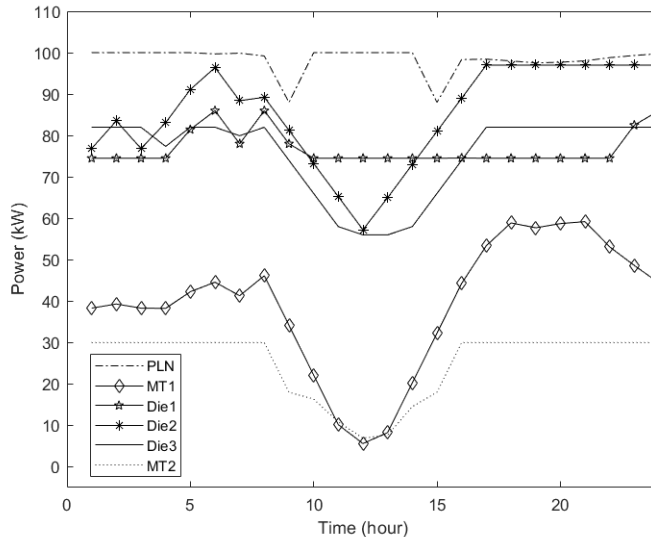
Dari 50 populasi yang didapatkan, ditemukan *best solution* untuk konfigurasi *energy storage* yaitu populasi nomor 27, dengan keterangan seperti pada Tabel 4. 3.

Tabel 4. 3 Peletakan dan Kapasitas Optimal ES Kasus 2

Bus	Baterai	Kapasitas (Ah)
7	<i>Energy Storage 1</i> (ES-1)	525,04
15	<i>Energy Storage 2</i> (ES-2)	14989,81
14	<i>Energy Storage 3</i> (ES-3)	2748,82
12	<i>Energy Storage 4</i> (ES-4)	3733,89

4.2.2 Daya Terbangkit

Daya terbangkit pada studi kasus 2 terdapat pada Gambar 4. 4 dan Gambar 4. 5

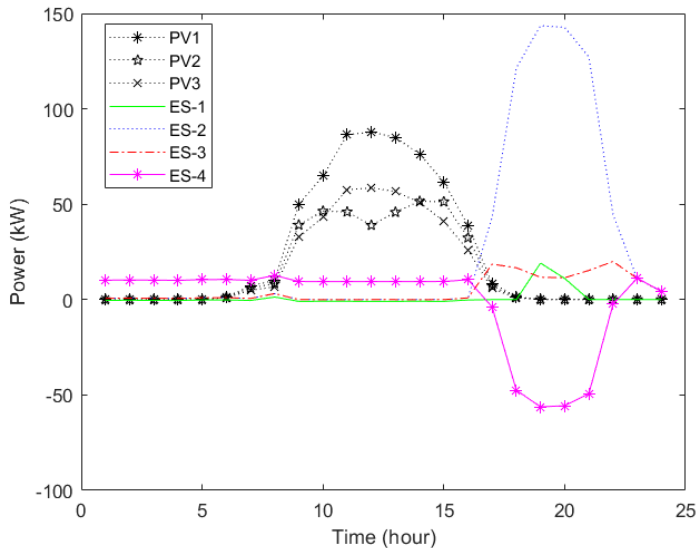


Gambar 4. 4 Daya Terbangkit Kasus 2

Pada kasus-2, grid PLN cenderung beroperasi secara konstan pada pembebanan maksimum (100 kW). Dengan penurunan sesaat selama 2 jam pada saat jam ke-8 dan jam ke-14. Pembangkit mikroturbin (MT-1 dan MT-2) mengalami penurunan pada saat jam ke-12. Dengan pembangkit mikroturbin 2 (MT-2) berada pada kapasitas maksimum saat jam ke-1 sampai jam ke-8 dan jam ke-16 sampai jam ke-24. MT-1 berada pada pembangkitan maksimum pada saat beban puncak (jam 18-21) namun tidak mencapai kapasitas maksimum (65 kW).

Penurunan daya saat jam ke-8 juga terjadi pada pembangkit disel (Die1, Die2, Die3) dengan masing-masing pembangkit berada pada daya minimum saat jam ke-12. Hal ini terjadi akibat daya PV yang mulai bertambah pada jam ke-6 dan mencapai puncak pada

rentang jam 11-13. Pembangkitan PV dan ES terdapat pada Gambar 4. 5.

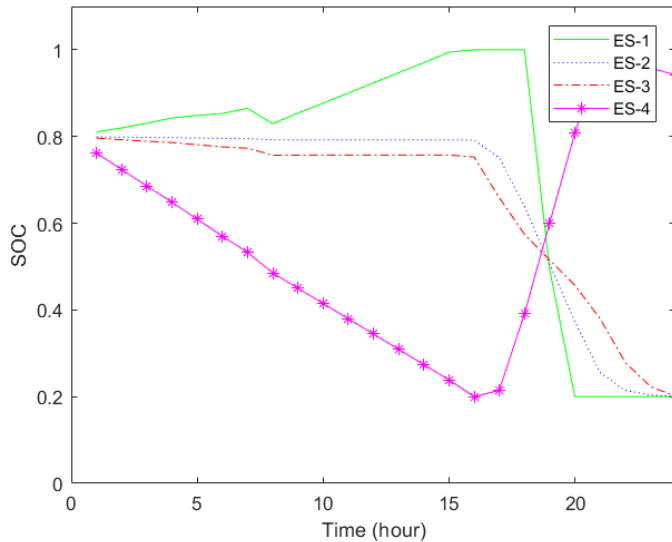


Gambar 4. 5 Pembangkitan PV dan Energy Storage

Pada rentang jam 1-16, ES mengalami pembangkitan yang cenderung konstan dengan perubahan yang tidak signifikan. Dengan ES-4 yang memberikan pembangkitan terbesar pada rentang 9-13 kW. Hal ini dikarenakan Sebagian besar beban sudah tersuplai oleh grid PLN, mikroturbin, disel, PV. Selain itu, pembangkitan baterai yang minim juga terjadi akibat sistem meminimalkan penggunaan baterai sehingga dapat digunakan dalam jangka panjang.

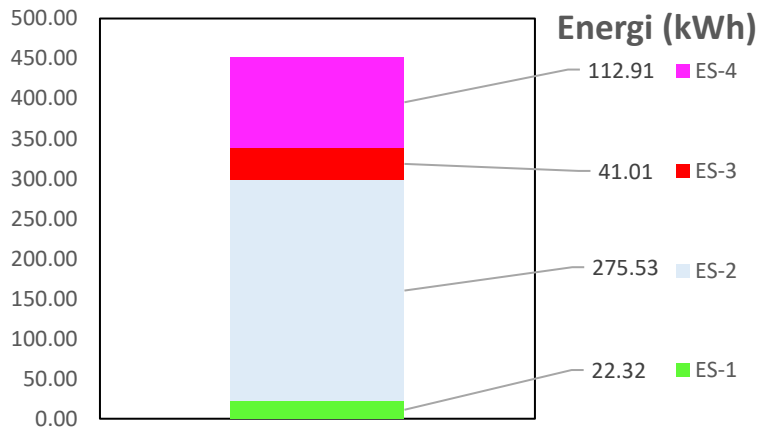
Pada saat suplai PV menurun (jam 16 – 18), ES-1, ES-2, dan ES-3 mulai menyuplai daya dengan daya puncak terbesar oleh ES-2 mencapai 143,57 kW pada saat jam ke-19 (puncak). Sedangkan ES-4 mengalami kondisi *charging* sehingga memberikan beban ke sistem sampai 56,21 kW.

4.2.3 SOC & Energi Baterai



Gambar 4. 6 SOC baterai

Dari Gambar 4. 6 tidak terdapat pelanggaran batasan SOC yang ada. ES-1 dan ES-4 mengalami *charging* dan *discharging* lebih dari satu kali. Dengan ES-2 dan ES-3 hanya mengalami *discharging* pada saat jam ke-16. ES-4 langsung mengalami *discharging* dari SOC 0.8 pada jam ke-1. Hal ini diperbolehkan mengingat batasan *discharging* minimum adalah 0.8. Sehingga baterai tidak harus *discharge* ketika kondisi *full charge* (1.0).



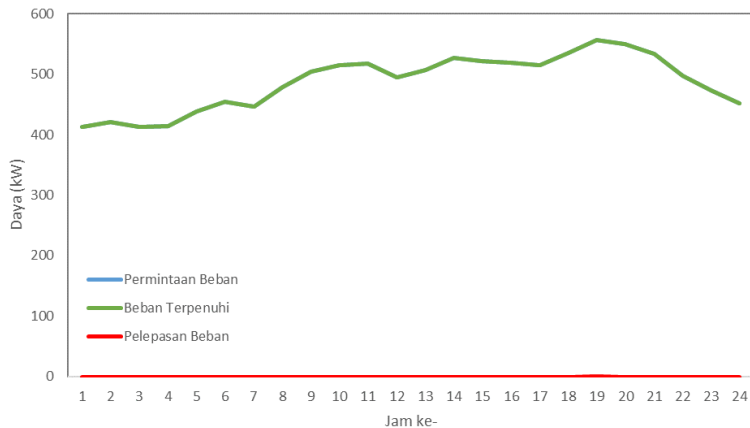
Gambar 4. 7 Energi ES kasus 2

Dari **Gambar 4. 7** didapatkan bahwa ES-2 adalah penyumbang energi terbesar pada sistem (275,53 kW). Dengan baterai ES-1 penyumbang kapasitas terkecil (22,32 kW). Total energi dari ES yang diberikan pada sistem sebesar 451,77 kW.

4.2.4 Batasan Pembangkit dan Saluran

Dari hasil kasus 2, daya yang dibangkitkan tiap jam selama 24 jam tidak melanggar batasan minimum atau maksimum pembangkit dan pembangkit mampu mengatur naik turunnya daya pada batasan *ramp rate* yang diizinkan. Selain itu, daya yang mengalir tidak melebihi kapasitas saluran yang diizinkan. (terlampir)

4.2.5 Profil Beban



Gambar 4. 8 Profil Beban Kasus 2

Dari Gambar 4. 8 didapatkan bahwa sistem dapat memenuhi permintaan beban selama 24 jam. Sehingga tidak ada mekanisme pelepasan beban.

4.2.6 Perhitungan Biaya

Dari konfigurasi baterai dan pembangkitan, didapatkan perhitungan biaya per-tahun seperti berikut:

Biaya Operasi Mikrogrid

Biaya Pembangkitan	\$71.453	/hari
Biaya Shedding	\$0	/hari
Biaya Operasi	\$71.453	/hari

Biaya Investasi ES

ES-1	\$1.023	/tahun
ES-2	\$29.211	/tahun
ES-3	\$5.357	/tahun
ES-4	\$7.276	/tahun

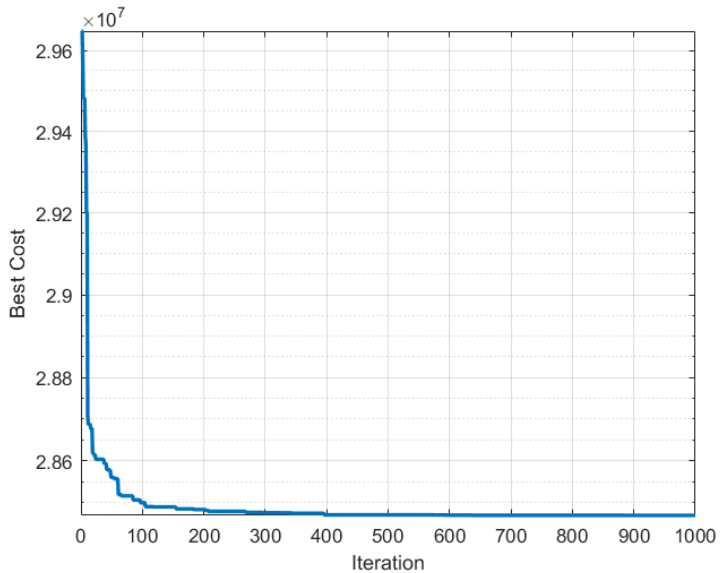
Biaya per-tahun

Biaya Operasi Mikrogrid	\$26.080.408	/tahun
Biaya Investasi ES	\$42.867	/tahun
Total Biaya	\$26.123.275	/tahun

Dari perhitungan biaya kasus 2 didapatkan total biaya per-tahun yang lebih murah daripada kasus 1 (penghematan sebesar **\$1.594.897/tahun**). Hal ini dikarenakan dengan adanya ES sistem dapat menghemat biaya operasi walaupun dengan biaya investasi baterai yang lebih mahal.

4.3 Kasus 3: Isolated**4.3.1 Peletakan dan Kapasitan Optimal *Energy Storage***

Selama *running*, algoritma DE terus mencari biaya per-tahun paling sedikit (*best cost*) sampai di titik saturasi yang menandakan bahwa tidak ada lagi konfigurasi baterai yang lebih optimal dari titik tersebut (*best solution*). Rekam jejak iterasi dan *best cost* setiap iterasinya terdapat pada Gambar 4. 9.



Gambar 4. 9 Seminologi best cost kasus 3

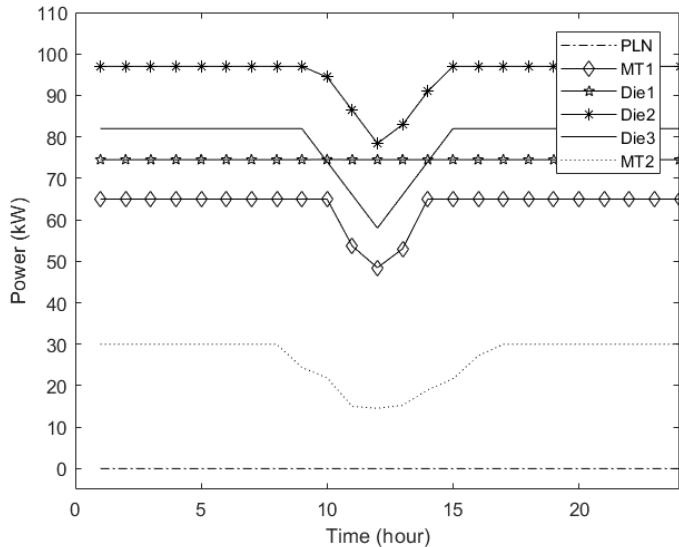
Dari 50 populasi yang didapatkan, ditemukan *best solution* untuk konfigurasi *energy storage* yaitu populasi nomor 27, dengan keterangan seperti pada **Tabel 4. 4** .

Tabel 4. 4 Peletakan dan Kapasitas Optimal Kasus 3

Bus	Baterai	Kapasitas (Ah)
7	<i>Energy Storage 1</i> (ES-1)	0,00
15	<i>Energy Storage 2</i> (ES-2)	42279,94
14	<i>Energy Storage 3</i> (ES-3)	2442,54
12	<i>Energy Storage 4</i> (ES-4)	388,71

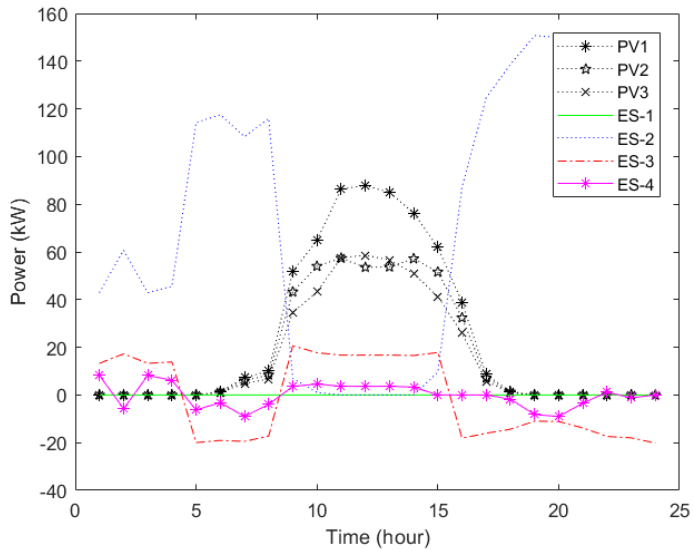
Dari hasil simulasi, didapatkan bahwa ES-1 yang tidak ditentukan alokasi busnya bukan berada pada penempatan yang optimal. Sehingga kapasitas ES berada pada angka minimum (0,00 Ah). Dari hasil pada kasus 2 sebelumnya, ES-1 juga merupakan baterai dengan kapasitas terkecil (525,04 Ah).

4.3.2 Daya Terbangkit



Gambar 4. 10 Daya Terbangkit Kasus 3

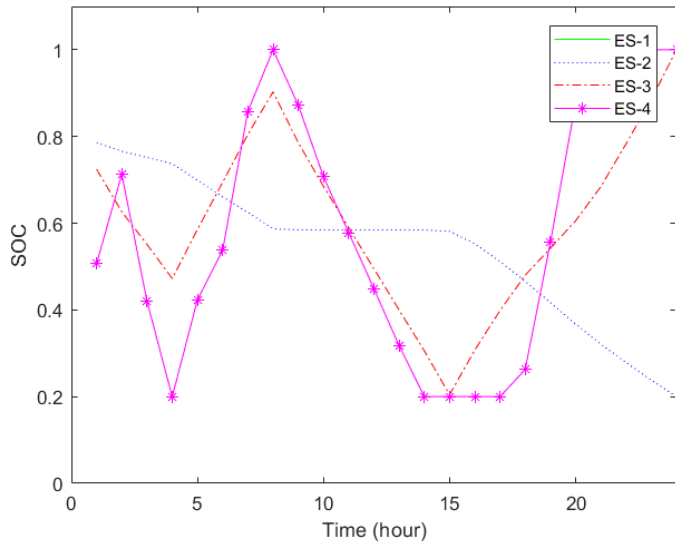
Dari gambar 4.10, terlihat bahwa seluruh pembangkit bekerja pada kapasitas maksimum selain pada waktu masuknya PV (8-16). Dengan pembangkit diesel 1 (Die1) bekerja secara konstan. Hal ini menunjukkan bahwa pembangkit harus menggantikan kekurangan suplai yang diakibatkan oleh tidak adanya grid PLN pada sistem.



Gambar 4. 11 Pembangkitan PV dan ES

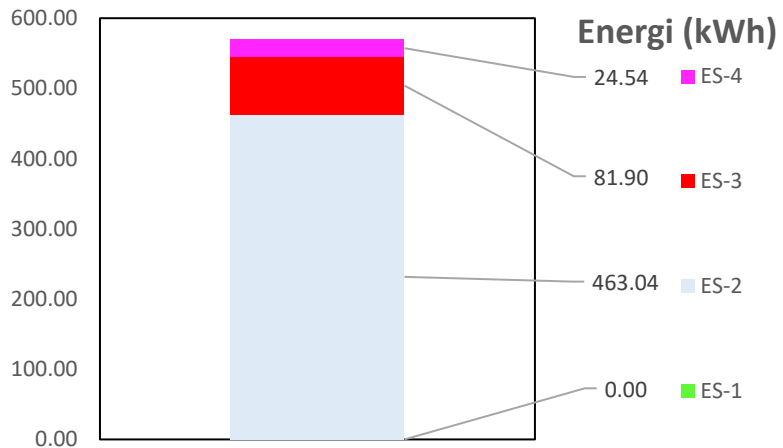
Gambar 4.11 memperlihatkan bahwa dengan tidak adanya grid PLN, ES bekerja secara aktif mulai dari pagi hari untuk memenuhi kebutuhan beban. Dengan ES-2 menyuplai daya terbesar pada sistem (150,74 kW saat beban puncak). Meskipun ES-2 memiliki daya *discharging* maksimum ($P_{dsc \max}$) yang jauh lebih besar (sekitar 1750 kW pada keadaan SOC 0.8), ES-2 tidak dapat bekerja pada daya tersebut dikarenakan energi baterai yang sudah menyusut akibat *discharging* sebelumnya. Alhasil tidak seperti pembangkit, baterai tidak bisa terus menerus memiliki “daya puncak” yang sama setiap jamnya.

4.3.3 SOC Baterai



Gambar 4. 12 SOC kasus 3

Meski ES harus melakukan mekanisme *charge* dan *discharge* secara berulang-ulang, tidak ada batasan SOC yang dilanggar pada hasil simulasi. Seperti kasus 2 sebelumnya, ES-2 hanya mengalami *discharging* dikarenakan kapasitas baterai yang besar dapat mengutilisasikan energi dari jam ke-1 samapai jam ke-24.

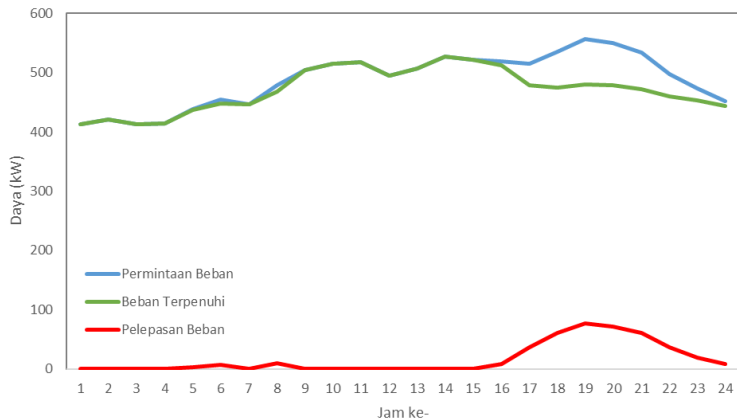


Gambar 4. 13 Energi ES pada sistem

4.3.4 Batasan Pembangkit dan Saluran

Meski hampir seluruh pembangkitan pada saat beban jam ke-18 ke atas mencapai kapasitas, tidak ada batasan *ramp rate* ataupun kapasitas dan pembangkitan minimum yang dilanggar oleh pembangkit. Selain itu batasan saluran juga tidak terlanggar.

4.3.5 Profil Beban



Gambar 4. 14 Profil beban kasus 3

Diagram pada gambar 4.14 juga disajikan dalam mendetil pada tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Profil beban kasus 3

Jam	1	2	3	4	5	6
Permintaan Beban	412,87	420,71	412,87	414,03	439,00	454,69
Beban Terpenuhi	412,87	420,71	412,87	414,03	436,55	447,33
Pelepasan Beban	0,00	0,00	0,00	0,00	2,46	7,36
Jam	7	8	9	10	11	12
Permintaan Beban	446,40	478,10	503,70	515,26	517,33	494,21
Beban Terpenuhi	446,40	468,39	503,70	515,26	517,33	494,21
Pelepasan Beban	0,00	9,72	0,00	0,00	0,00	0,00
Jam	13	14	15	16	17	18
Permintaan Beban	507,42	527,65	522,28	519,39	514,85	534,67
Beban Terpenuhi	507,42	527,65	522,28	511,84	478,73	474,56
Pelepasan Beban	0,00	0,00	0,00	7,55	36,12	60,11
Jam	19	20	21	22	23	24

Permintaan Beban	556,96	549,53	533,84	497,51	472,74	452,09
Beban Terpenuhi	480,08	478,30	472,58	460,54	453,58	444,15
Pelepasan Beban	76,88	71,23	61,26	36,97	19,16	7,95
Total						
Permintaan Beban	11698,09 kWh					
Beban Terpenuhi	11301,34 kWh					
Pelepasan Beban	396,75 kWh					

Dari hasil simulasi kasus 3, didapatkan bahwa *shedding* berhasil dikurangi dibandingkan dengan *hybrid* tanpa ES (kasus 1). Hal ini dikarenakan kurangnya pembangkit yang dapat menopang perminta beban. Pada contoh kasus jam ke-19, permintaan beban sebesar 556,96 kW. Dimana kapasitas pembangkit mikroturbin dan diesel hanya sebesar 360 kW. Sedangkan ES-1 & ES-3 sudah mengalami *discharging* pada pagi hari. Sehingga harus dilakukan *charging* pada malam hari. Hasilnya, pada saat jam ke-19 sistem hanya bisa diberikan pembangkitan tambahan dari ES-3 yang kapasitasnya tergolong lebih besar dan justru mendapatkan beban tambahan akibat *charging* ES-1 & ES-3. Dikarenakan daya tambahan tersebut juga tidak cukup untuk memenuhi permintaan beban, maka dilakukan pelepasan beban.

4.3.6 Perhitungan Biaya

Biaya Operasi Mikrogrid

Biaya Pembangkitan	\$77.719	/hari
Biaya Shedding	\$37	/hari
Biaya Operasi	\$77.757	/hari

Biaya Investasi ES

ES-1	\$0	/tahun
ES-2	\$82.392	/tahun
ES-3	\$4.760	/tahun
ES-4	\$757	/tahun

Biaya per-tahun

Biaya Operasi	\$28.381.182	/tahun
Biaya Investasi ES	\$87.909	/tahun
Total Biaya	\$28.469.091	/tahun

Dari perhitungan kasus 3 didapatkan bahwa penggunaan ES dengan kondisi *isolated* (tanpa suplai PLN) menyebabkan biaya operasi lebih besar dari kondisi *hybrid*. Namun, pelepasan beban berhasil dikurangi sehingga biaya *shedding* lebih kecil \$5/tahun dibandingkan dengan kasus 1.

Jika seluruh ES (ES-1 dan ES-2) dapat ditentukan lokasi optimalnya, akan ada potensi pengurangan biaya operasional yang terjadi. Hal ini dikarenakan ES-1 yang lokasinya tetap pada bus 7 ditemukan tidak memiliki kapasitas pada kasus 3. Akibatnya, Sebagian potensi kapasitas ES tidak dapat digunakan untuk menopang pembangkitan sistem. Padahal, ES tidak memiliki biaya pembangkitan seperti pembangkit lainnya.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari simulasi kasus pada **BAB 4** adalah sebagai berikut:

1. Pada kasus 1 (*hybrid* tanpa baterai) didapatkan kapasitas pembangkit 460 kW, daya puncak PV 219,60 kW, dan pelepasan beban sebesar 492,35 kWh selama 24 jam.
2. Pada kasus 2 (*hybrid* dengan baterai) didapatkan ES dengan: ES-1 525,04 Ah pada bus 7, ES-2 14989,81 Ah pada bus 15, ES-3 2748,82 Ah pada bus 14, dan ES-4 3733,89 Ah pada bus 12 tanpa adanya pelepasan beban pada sistem.
3. Pada kasus 3 (*hybrid* dengan baterai) didapatkan ES dengan: ES-1 0,00 Ah, ES-2 42279,94 Ah pada bus 15, ES-3 2442,54 Ah pada bus 14, dan ES-4 388,71 Ah pada bus 12. Dengan pelepasan beban sebesar 396,75 kWh selama 24 jam.
4. Menaikkan jumlah iterasi program *differential evolution* akan memberikan hasil biaya per-tahun lebih optimal.
5. Penentuan kapasitas serta alokasi *energy storage* optimal berpotensi mengurangi biaya per-tahun.
6. Besar kapasitas *energy storage* optimal menyesuaikan dengan permintaan beban pada sistem.
7. Besar kapasitas serta penempatan *energy storage* optimal menyesuaikan dengan konfigurasi sistem.

5.2 Saran

Berikut adalah saran dari penulis untuk pengembangan ilmu dan penelitian ke depan:

1. Pemilihan kasus dengan kondisi *existing* ES tanpa penentuan lokasi dan kapasitas optimal sebagai pembandingan penelitian
2. Penelitian dapat dilakukan pada sistem mikrogrid *real*.
3. Penelitian dapat dilakukan dengan mencari seluruh lokasi baterai optimal.
4. Penelitian dapat dikembangkan dengan optimasi daya pelepasan beban.
5. Penelitian dapat dikembangkan untuk kasus *kontingensi*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Sadaat, *Power System Analysis*, Milwaukee: McGraw-Hill, 1999.
- [2] T. Dragičević and F. Blaabjerg, "Power Electronics for Microgrids: Concepts and Future Trends," in *Microgrid: Advanced Control Methods and Renewable Energy System Integration*, UK, Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 263-279.
- [3] P. Breeze, *Gas-Turbine Power Generation*, Massachusetts: Academic Press, 2016.
- [4] I. I. Picioroagă, M. Sănduleac and D. o. E. P. Systems, "Optimal Allocation of Energy Storage Systems for Resilient Distribution Networks Focusing on Critical Loads," in *THE XIth INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING*, Bucharest, 2019.
- [5] Q. Fu, A. Hamidi, A. Nasiri, V. Bhavaraju, S. B. Krstic and P. Theisen, "The Role of Energy Storage in a Microgrid Concept: Examining the opportunities and promise of microgrids.," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 21-29, 2013.
- [6] Y. Sun, Q. Ding, P. Zeng and F. Sun, "Optimal sizing of a wind-energy storage system considering battery life," in *International Conference on Power System Technology*, Guangzhou, 2018.
- [7] D. Jenkins, J. Fletcher and D. Kane, "Lifetime prediction and sizing of lead-acid batteries for microgeneration storage application," *IET Renew. Power Generation*, vol. 2, no. 3, pp. 191-200, 2008.
- [8] K. Morison, L. Wang and P. Kundur, "Power system security assessment," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 2, no. 5, pp. 30-39, Oktober 2004.
- [9] A. J. Wood, B. F. Wollenberg and G. B. Sheble, *POWER GENERATION, OPERATION, AND CONTROL*, New Jersey: Wiley, 2014.
- [10] J. Stones and A. Collinson, "Power Quality," *Power Engineering Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 58-64, April 2001.

- [11] F. Li and R. Bo, "DCOPF-Based LMP Simulation: Algorithm, Comparison With ACOPF, and Sensitivity," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 1475-1485, 2007.
- [12] P. P. Biswas, P. N. Sugathan, R. Mallipeddi and A. J. A. Gehan, "Optimal Power Flow Solutions Using Differential Evolution Algorithm Integrated with Effective Constraint Handling," *Engineering Application of Artificial Intelligence*, vol. 68, pp. 81-100, 2018.
- [13] D. G. Newman, T. G. Eschenbach and J. P. Lavelle, "ANNUAL CASH FLOW ANALYSIS," in *ENGINEERING ECONOMIC ANALYSIS*, New York, OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2012, pp. 191-192.
- [14] R. Fu, T. Remo and R. Margolis, "Evaluating the Cost Benefits of U.S. Utility-Scale Photovoltaics," in *IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Hawaii, 2018.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Populasi kasus 2.....	59
Lampiran 2 Populasi Kasus 3.....	61
Lampiran 3 Daya terbangkit kasus 1.....	63
Lampiran 4 Daya terbangkit kasus 2.....	65
Lampiran 5 Daya Pembangkit Kasus 3	67
Lampiran 6 Ramp Rate Kasus 1.....	69
Lampiran 7 Ramp Rate Kasus 2.....	70
Lampiran 8 Ramp Rate Kasus 3.....	72
Lampiran 9 Daya Transmisi Kasus 1	74
Lampiran 10 Daya Transmisi Kasus 2	79
Lampiran 11 Daya Transmisi Kasus 3	84
Lampiran 12 Energi ES Selama 24 Jam Kasus 2	89
Lampiran 13 Energi ES selama 24 Jam Kasus 3.....	90

Lampiran 1 Populasi kasus 2

ES-1 (Ah)	ES-2 (Ah)	ES-3 (Ah)	ES-4 (Ah)	Bus ES-3	Bus ES-4	\$/year
525,04	14989,80	2748,79	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,80	2748,86	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,80	2748,78	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,80	2748,82	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,77	2748,82	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,81	2748,88	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,67	2748,84	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,77	2748,88	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,77	2748,82	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,77	2748,85	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,81	2748,87	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,81	2748,84	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,78	2748,88	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,77	2748,89	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,80	2748,89	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,80	2748,86	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,60	2748,88	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,80	2748,83	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,79	2748,81	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,66	2748,86	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,78	2748,82	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,81	2748,90	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,80	2748,84	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,81	2748,90	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,80	2748,85	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,80	2748,85	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,79	2748,83	3733,89	14	12	26123275,37

525,04	14989,62	2748,81	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,76	2748,74	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,79	2748,84	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,78	2748,82	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,81	2748,84	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,81	2748,85	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,81	2748,84	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,77	2748,92	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,81	2748,86	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,67	2748,88	3733,89	14	12	26123275,38
525,04	14989,76	2748,81	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,81	2748,82	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,81	2748,79	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,80	2748,86	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,77	2748,90	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,81	2748,91	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,81	2748,76	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,78	2748,89	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,77	2748,79	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,78	2748,74	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,81	2748,86	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,78	2748,88	3733,89	14	12	26123275,37
525,04	14989,81	2748,92	3733,89	14	12	26123275,37

Lampiran 2 Populasi Kasus 3

ES-1	ES-2	ES-3	ES-4	Bus ES-3	Bus ES-4	\$/year
0,00	42282,86	2430,55	387,79	14	12	28469183,28
0,00	42350,33	2436,43	388,76	14	12	28469232,57
0,00	42276,96	2428,86	387,85	14	12	28469180,56
0,00	42348,99	2434,66	389,02	14	12	28469219,61
0,00	42337,25	2447,47	390,03	14	12	28469299,42
0,00	42264,25	2423,14	387,77	14	12	28469234,37
0,00	42188,41	466,46	2134,19	12	14	28473913,65
0,00	42319,67	2420,74	390,44	14	12	28469334,17
0,00	42365,03	2428,71	389,18	14	12	28469226,81
0,00	42254,65	475,83	2136,22	13	14	28474082,97
0,00	42204,97	369,15	2391,09	13	14	28473205,98
0,00	42292,03	2430,76	388,07	14	12	28469186,44
0,00	42343,68	2439,74	388,93	14	12	28469248,1
0,00	42368,71	2434,13	388,38	14	12	28469248,27
0,00	42279,03	2430,77	387,93	14	12	28469185,61
0,00	42274,91	2428,69	388,19	14	12	28469180,16
0,00	42295,95	2431,70	387,89	14	12	28469200,47
0,00	42160,18	360,34	2532,51	13	14	28474716,23
0,00	42276,81	2427,51	387,66	14	12	28469150,97
0,00	42297,36	2442,22	390,08	14	12	28469226,18
0,00	37736,56	2702,83	5494,60	13	19	28557505,18
0,00	38077,65	2703,79	5493,47	13	19	28554811,63
0,00	42315,47	2427,21	390,91	14	13	28469169,84
0,00	42279,94	2442,54	388,71	14	12	28469090,69
0,00	42352,29	2424,77	389,05	14	13	28469204,44
0,00	42288,61	2431,51	387,82	14	12	28469203,19
0,00	42284,18	2430,37	388,25	14	12	28469184,66

0,00	42351,18	2437,65	389,37	14	12	28469248,38
0,00	42244,63	470,50	2134,96	12	14	28473616,19
0,00	42274,02	2420,80	390,40	14	12	28469265,44
0,00	42294,40	2441,67	389,45	14	12	28469135,16
0,00	42339,90	2443,47	388,98	14	12	28469275,14
0,00	42346,01	2436,00	388,30	14	12	28469223,37
0,00	42334,52	2432,10	389,56	14	13	28469234,15
0,00	42209,92	473,86	2119,08	13	14	28473896,43
0,00	42279,10	2427,37	388,84	14	12	28469141,07
0,00	37777,60	6446,35	2682,73	19	13	28559859,35
0,00	42278,72	2441,47	389,22	14	12	28469217,13
0,00	42351,33	2434,42	388,66	14	12	28469218,63
0,00	42285,22	2430,57	388,25	14	12	28469187,79
0,00	42347,40	2419,72	391,30	14	13	28469317,39
0,00	42346,06	2439,11	389,10	14	12	28469247,09
0,00	42351,39	2425,71	389,49	14	12	28469209,35
0,00	42298,04	2442,04	387,80	14	12	28469188,01
0,00	42325,02	2418,18	391,80	14	13	28469301,38
0,00	42175,14	460,02	2136,31	12	14	28474599,32
0,00	42293,58	2431,99	387,14	14	12	28469207,49
0,00	42271,51	471,98	2134,89	13	14	28473763,96
0,00	42137,11	361,14	2390,17	13	14	28474178,96
0,00	42293,64	2414,20	393,94	14	13	28469281,35

Lampiran 3 Daya terbangkit kasus 1

Jam	1	2	3	4	5	6
PLN	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Mikroturbin 1	37,17	38,16	37,17	37,54	41,95	45,34
Baterai 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,44
Baterai 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diesel 1	74,50	74,50	74,50	78,00	86,00	86,00
PV 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,20
Baterai 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diesel 2	89,20	96,05	89,20	89,00	97,00	97,00
Diesel 3	82,00	82,00	82,00	79,49	82,00	82,00
Baterai 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,96
Mikroturbin 2	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Jam	7	8	9	10	11	12
PLN	99,88	100,00	88,00	100,00	89,00	89,69
Mikroturbin 1	40,37	46,45	34,45	22,45	10,45	0,19
Baterai 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV 1	7,20	10,08	49,39	64,80	86,40	87,84
Baterai 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diesel 1	79,15	86,00	78,00	74,50	74,50	74,50
PV 2	6,00	8,40	40,63	54,00	67,86	61,89
Baterai 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diesel 2	97,00	97,00	89,00	81,00	73,00	65,00
Diesel 3	82,00	82,00	74,00	66,00	58,00	56,00
Baterai 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV 3	4,80	6,72	32,24	43,20	57,60	58,56
Mikroturbin 2	30,00	30,00	18,00	9,31	0,52	0,54
Jam	13	14	15	16	17	18

PLN	99,99	100,00	91,62	98,33	100,00	100,00
Mikroturbin 1	8,04	20,04	32,04	44,04	55,28	61,35
Baterai 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV 1	84,96	76,32	61,92	38,88	8,64	1,44
Baterai 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diesel 1	74,50	74,50	74,50	82,50	86,00	86,00
PV 2	60,29	63,60	51,60	32,40	7,20	1,20
Baterai 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diesel 2	65,00	73,00	81,00	89,00	97,00	97,00
Diesel 3	56,00	62,32	70,32	78,32	82,00	82,00
Baterai 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV 3	56,64	50,88	41,28	25,92	5,76	0,96
Mikroturbin 2	2,00	6,99	18,00	30,00	30,00	30,00
Jam	19	20	21	22	23	24
PLN	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Mikroturbin 1	65,00	64,45	61,70	55,30	50,29	45,51
Baterai 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Baterai 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diesel 1	86,00	86,00	86,00	86,00	86,00	86,00
PV 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Baterai 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diesel 2	97,00	97,00	97,00	97,00	97,00	97,00
Diesel 3	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00
Baterai 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mikroturbin 2	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00

Lampiran 4 Daya terbangkit kasus 2

Jam	1	2	3	4	5	6
PLN	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,70
Mikroturbin 1	38,31	39,31	38,31	38,26	42,27	44,59
Baterai 1	-0,40	-0,36	-0,40	-0,47	-0,21	-0,17
PV 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,44
Baterai 2	0,70	0,75	0,70	0,59	0,96	1,02
Diesel 1	74,50	74,50	74,50	74,50	81,45	86,00
PV 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,20
Baterai 3	0,70	0,75	0,70	0,59	0,96	1,03
Diesel 2	76,85	83,52	76,85	83,10	91,10	96,40
Diesel 3	82,00	82,00	82,00	77,36	82,00	82,00
Baterai 4	10,20	10,25	10,20	10,09	10,47	10,53
PV 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,96
Mikroturbin 2	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Jam	7	8	9	10	11	12
PLN	99,88	99,20	88,00	100,00	100,00	100,00
Mikroturbin 1	41,31	46,16	34,16	22,16	10,16	5,61
Baterai 1	-0,46	1,34	-0,92	-0,86	-0,88	-0,89
PV 1	7,20	10,08	49,87	64,80	86,40	87,84
Baterai 2	0,61	3,13	0,00	0,00	0,00	0,00
Diesel 1	78,00	86,00	78,00	74,50	74,50	74,50
PV 2	6,00	8,40	39,08	46,42	46,00	38,96
Baterai 3	0,61	3,15	0,00	-0,01	-0,01	-0,01
Diesel 2	88,40	89,24	81,24	73,24	65,24	57,24
Diesel 3	79,93	82,00	74,00	66,00	58,00	56,00
Baterai 4	10,11	12,68	9,49	9,46	9,47	9,48
PV 3	4,80	6,72	32,78	43,20	57,60	58,56
Mikroturbin 2	30,00	30,00	18,00	16,36	10,85	6,92
Jam	13	14	15	16	17	18

PLN	100,00	100,00	88,00	98,33	98,43	98,01
Mikroturbin 1	8,27	20,27	32,27	44,27	53,39	58,91
Baterai 1	-0,89	-0,87	-0,92	-0,20	0,00	0,00
PV 1	84,96	76,32	61,64	38,88	8,64	1,44
Baterai 2	0,00	0,00	0,00	0,90	43,25	121,48
Diesel 1	74,50	74,50	74,50	74,57	74,50	74,50
PV 2	45,81	51,55	51,30	32,40	7,20	1,20
Baterai 3	-0,01	-0,01	0,00	0,91	18,61	16,68
Diesel 2	65,00	73,00	81,00	89,00	97,00	97,00
Diesel 3	56,00	58,00	66,00	74,00	82,00	82,00
Baterai 4	9,48	9,46	9,49	10,41	-3,92	-47,51
PV 3	56,64	50,88	41,00	25,92	5,76	0,96
Mikroturbin 2	7,65	14,54	18,00	30,00	30,00	30,00
Jam	19	20	21	22	23	24
PLN	97,53	97,69	98,02	98,79	99,32	99,76
Mikroturbin 1	57,72	58,73	59,21	53,12	48,62	44,39
Baterai 1	19,14	11,10	0,00	0,00	0,00	0,00
PV 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Baterai 2	143,58	142,69	127,17	44,55	10,98	4,27
Diesel 1	74,50	74,50	74,50	74,50	82,50	86,00
PV 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Baterai 3	11,70	11,47	15,27	19,99	11,09	4,31
Diesel 2	97,00	97,00	97,00	97,00	97,00	97,00
Diesel 3	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00
Baterai 4	-56,21	-55,65	-49,33	-2,44	11,23	4,36
PV 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mikroturbin 2	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00

Lampiran 5 Daya Pembangkit Kasus 3

Jam	1	2	3	4	5	6
PLN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mikroturbin 1	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00
Baterai 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,44
Baterai 2	42,90	60,74	42,90	45,53	114,27	117,49
Diesel 1	74,50	74,50	74,50	74,50	74,50	74,50
PV 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,20
Baterai 3	13,26	17,26	13,26	13,85	-19,97	-19,06
Diesel 2	97,00	97,00	97,00	97,00	97,00	97,00
Diesel 3	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00
Baterai 4	8,21	-5,78	8,21	6,15	-6,25	-3,20
PV 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,96
Mikroturbin 2	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Jam	7	8	9	10	11	12
PLN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mikroturbin 1	65,00	65,00	65,00	65,00	53,68	48,45
Baterai 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV 1	7,20	10,08	51,84	64,80	86,40	87,84
Baterai 2	108,33	115,91	6,99	1,05	0,00	0,00
Diesel 1	74,50	74,50	74,50	74,54	74,50	74,50
PV 2	6,00	8,40	43,20	54,00	57,39	53,56
Baterai 3	-19,46	-17,25	20,64	17,74	16,70	16,71
Diesel 2	97,00	97,00	97,00	94,43	86,43	78,43
Diesel 3	82,00	82,00	82,00	74,00	66,00	58,00
Baterai 4	-8,97	-3,97	3,58	4,62	3,61	3,62
PV 3	4,80	6,72	34,56	43,20	57,60	58,56
Mikroturbin 2	30,00	30,00	24,40	21,89	15,02	14,54

Jam	13	14	15	16	17	18
PLN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mikroturbin 1	53,00	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00
Baterai 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV 1	84,96	76,32	61,92	38,88	8,64	1,44
Baterai 2	0,00	0,00	9,53	87,07	124,66	138,56
Diesel 1	74,50	74,50	74,50	74,50	74,50	74,50
PV 2	53,71	57,18	51,60	32,40	7,20	1,20
Baterai 3	16,73	16,56	17,80	-18,12	-16,03	-14,35
Diesel 2	82,94	90,94	97,00	97,00	97,00	97,00
Diesel 3	66,00	74,00	82,00	82,00	82,00	82,00
Baterai 4	3,68	3,29	0,00	0,00	0,00	-1,75
PV 3	56,64	50,88	41,28	25,92	5,76	0,96
Mikroturbin 2	15,26	18,98	21,65	27,19	30,00	30,00
Jam	19	20	21	22	23	24
PLN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mikroturbin 1	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00
Baterai 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Baterai 2	150,74	149,92	141,34	128,25	124,22	115,82
Diesel 1	74,50	74,50	74,50	74,50	74,50	74,50
PV 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Baterai 3	-10,96	-11,10	-13,84	-17,38	-17,97	-20,17
Diesel 2	97,00	97,00	97,00	97,00	97,00	97,00
Diesel 3	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00
Baterai 4	-8,20	-9,02	-3,42	1,17	-1,17	0,00
PV 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mikroturbin 2	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00

Lampiran 6 Ramp Rate Kasus 1

Pembangkit	Ramp Rate	Interval Waktu ke-							
		1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
PLN	12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	12,0
Mikrotur bin 1	12	1,0	1,0	0,4	4,4	3,4	5,0	6,1	12,0
Diesel 1	8	0,0	0,0	3,5	8,0	0,0	6,9	6,9	8,0
Diesel 2	8	6,9	6,9	0,2	8,0	0,0	0,0	0,0	8,0
Diesel 3	8	0,0	0,0	2,5	2,5	0,0	0,0	0,0	8,0
Mikrotur bin 2	12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,0
Pembangkit	Ramp Rate	Interval Waktu ke-							
		9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17
PLN	12	12,0	11,0	0,7	10,3	0,0	8,4	6,7	1,7
Mikrotur bin 1	12	12,0	12,0	10,3	7,9	12,0	12,0	12,0	11,2
Diesel 1	8	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	3,5
Diesel 2	8	8,0	8,0	8,0	0,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Diesel 3	8	8,0	8,0	2,0	0,0	6,3	8,0	8,0	3,7
Mikrotur bin 2	12	8,7	8,8	0,0	1,5	5,0	11,0	12,0	0,0
Pembangkit	Ramp Rate	Interval Waktu ke-							
		17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	
PLN	12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Mikrotur bin 1	12	6,1	3,6	0,6	2,7	6,4	5,0	4,8	
Diesel 1	8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Diesel 2	8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Diesel 3	8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Mikrotur bin 2	12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Lampiran 7 Ramp Rate Kasus 2

Pembangkit	Ramp Rate	Interval Waktu ke-							
		1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
PLN	12	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,3 0	0,1 8	0,6 7	11, 20
Mikrotur bin 1	12	0,9 9	0,9 9	0,0 6	4,0 1	2,3 2	3,2 7	4,8 5	12, 00
Diesel 1	8	0,0 0	0,0 0	0,0 0	6,9 5	4,5 5	8,0 0	8,0 0	8,0 0
Diesel 2	8	6,6 6	6,6 6	6,2 5	8,0 0	5,2 9	8,0 0	0,8 4	8,0 0
Diesel 3	8	0,0 0	0,0 0	4,6 4	4,6 4	0,0 0	2,0 7	2,0 7	8,0 0
Mikrotur bin 2	12	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	12, 00
Pembangkit	Ramp Rate	Interval Waktu ke-							
		9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17
PLN	12	12, 00	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	12, 00	10, 33	0,1 0
Mikrotur bin 1	12	12, 00	11, 99	4,5 6	2,6 7	12, 00	12, 00	12, 00	9,1 1
Diesel 1	8	3,5 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 7	0,0 7
Diesel 2	8	8,0 0	8,0 0	8,0 0	7,7 6	8,0 0	8,0 0	8,0 0	8,0 0
Diesel 3	8	8,0 0	8,0 0	2,0 0	0,0 0	2,0 0	8,0 0	8,0 0	8,0 0
Mikrotur bin 2	12	1,6 4	5,5 1	3,9 3	0,7 3	6,8 9	3,4 6	12, 00	0,0 0
Pembangkit	Ramp Rate	Interval Waktu ke-							
		17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	
PLN	12	0,4 2	0,4 7	0,1 6	0,3 3	0,7 7	0,5 2	0,4 4	
Mikrotur bin 1	12	5,5 2	1,1 8	1,0 1	0,4 8	6,0 8	4,5 0	4,2 3	

Diesel 1	8	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	8,0 0	3,5 0	
Diesel 2	8	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	
Diesel 3	8	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	
Mikrotur bin 2	12	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	

Lampiran 8 Ramp Rate Kasus 3

Pembangkit	Ramp Rate	Interval Waktu ke-							
		1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
PLN	12	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0
Mikrotur bin 1	12	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0
Diesel 1	8	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0
Diesel 2	8	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0
Diesel 3	8	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0
Mikrotur bin 2	12	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	5,6 0
Pembangkit	Ramp Rate	Interval Waktu ke-							
		9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17
PLN	12	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0
Mikrotur bin 1	12	0,0 0	11, 32	5,2 2	4,5 5	12, 00	0,0 0	0,0 0	0,0 0
Diesel 1	8	0,0 4	0,0 4	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0
Diesel 2	8	2,5 7	8,0 0	8,0 0	4,5 1	8,0 0	6,0 6	0,0 0	0,0 0
Diesel 3	8	8,0 0	8,0 0	8,0 0	8,0 0	8,0 0	8,0 0	0,0 0	0,0 0
Mikrotur bin 2	12	2,5 1	6,8 7	0,4 8	0,7 1	3,7 3	2,6 6	5,5 5	2,8 1
Pembangkit	Ramp Rate	Interval Waktu ke-							
		17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	
PLN	12	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	
Mikrotur bin 1	12	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	

Diesel 1	8	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	
Diesel 2	8	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	
Diesel 3	8	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	
Mikrotur bin 2	12	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	

Lampiran 9 Daya Transmisi Kasus 1

From	To	Kapasitas	1	2	3	4	5	6	7	8
1	2	130	68	68	68	68	68	68	68	68
1	3	32	32	32	32	32	32	32	32	32
2	4	16	16	16	16	16	16	16	16	16
3	4	32	19	19	19	19	18	18	18	18
2	5	32	20	21	20	20	21	22	20	21
2	6	32	24	24	24	25	25	26	24	26
4	6	90	42	42	42	43	46	51	42	50
5	7	32	20	21	20	20	21	22	20	21
6	7	70	26	27	26	26	28	28	24	23
6	8	90	52	53	52	53	56	58	57	61
6	9	65	-11	-12	-11	-10	-12	-10	-12	-9
6	10	32	-6	-7	-6	-6	-7	-6	-7	-5
9	11	16	0	0	0	0	0	0	0	0
9	10	65	-11	-12	-11	-10	-12	-10	-12	-9
4	12	70	-23	-23	-23	-24	-26	-24	-25	-24
12	13	90	-75	-75	-75	-78	-86	-86	-79	-86
12	14	16	7	7	7	7	8	9	7	8
12	15	65	5	5	5	7	8	9	4	7
12	16	32	17	16	17	17	18	19	18	20
14	15	32	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-7	-6
16	17	16	9	8	9	10	10	11	10	11
15	18	70	25	25	25	25	26	27	27	29
18	19	65	14	14	14	14	15	15	15	17
19	20	16	-5	-6	-5	-5	-6	-6	-6	-6
10	20	32	16	17	16	16	17	18	17	18
10	17	65	10	11	10	9	9	10	10	10
10	21	65	-31	-33	-31	-30	-33	-32	-33	-32
10	22	65	-23	-25	-23	-23	-25	-24	-25	-24

21	22	90	-67	-70	-67	-66	-71	-71	-72	-73
15	23	90	-42	-43	-42	-40	-41	-41	-41	-40
22	24	32	-1	1	-1	0	1	1	0	-1
23	24	70	31	31	31	31	32	32	31	32
24	25	65	13	13	13	13	14	14	12	11
25	26	65	7	7	7	7	8	7	3	2
25	27	65	6	6	6	5	7	7	9	9
28	27	16	-5	-5	-5	-5	-4	-3	-5	-4
27	29	32	15	16	15	15	16	17	17	18
27	30	32	15	16	15	15	16	17	17	18
29	30	32	6	6	6	6	7	7	7	7
8	28	16	-9	-9	-9	-9	-9	-10	-10	-10
9	28	16	4	5	4	5	6	7	5	7
From	To	Kapasitas	9	10	11	12	13	14	15	16
1	2	130	61	70	64	66	72	70	63	66
1	3	32	27	30	25	24	28	30	28	32
2	4	16	12	12	7	5	9	11	12	16
3	4	32	11	13	8	8	12	13	12	15
2	5	32	10	7	0	-2	1	5	8	15
2	6	32	19	18	12	10	15	18	19	24
4	6	90	34	33	26	24	28	32	32	39
5	7	32	10	7	0	-2	1	5	8	15
6	7	70	-2	-13	-28	-30	-29	-21	-11	5
6	8	90	64	66	66	63	65	67	66	65
6	9	65	-9	-5	-5	-4	-1	-3	-6	-7
6	10	32	-5	-3	-3	-2	-1	-2	-3	-4
9	11	16	0	0	0	0	0	0	0	0
9	10	65	-9	-5	-5	-4	-1	-3	-6	-7
4	12	70	-30	-28	-31	-30	-26	-28	-28	-27
12	13	90	-78	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-83

12	14	16	5	4	3	3	4	4	4	6
12	15	65	-7	-10	-14	-11	-9	-12	-10	-2
12	16	32	22	24	26	25	25	26	24	23
14	15	32	-11	-12	-13	-12	-11	-13	-12	-10
16	17	16	13	14	16	16	16	16	14	13
15	18	70	35	37	39	37	37	39	37	35
18	19	65	22	23	25	24	24	25	23	21
19	20	16	-2	-1	1	1	0	0	-1	-3
10	20	32	15	14	12	12	13	13	15	17
10	17	65	9	9	7	6	7	8	9	10
10	21	65	-30	-25	-22	-20	-18	-22	-26	-29
10	22	65	-24	-21	-19	-18	-17	-19	-22	-23
21	22	90	-73	-70	-67	-63	-63	-67	-71	-74
15	23	90	-32	-25	-19	-19	-18	-21	-29	-36
22	24	32	-8	-10	-14	-15	-15	-13	-12	-9
23	24	70	32	30	29	27	27	30	31	32
24	25	65	2	-2	-8	-10	-9	-6	-4	1
25	26	65	-23	-34	-49	-50	-48	-42	-32	-17
25	27	65	25	32	41	40	38	35	28	18
28	27	16	-6	-3	-3	-4	-3	-3	-7	-9
27	29	32	19	19	19	18	19	20	19	19
27	30	32	19	19	19	18	19	20	20	19
29	30	32	8	8	8	8	8	8	8	8
8	28	16	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-12	-12
9	28	16	5	8	8	7	8	8	5	3
From	To	Kapasitas	17	18	19	20	21	22	23	24
1	2	130	68	68	68	68	68	68	68	68
1	3	32	32	32	32	32	32	32	32	32
2	4	16	16	16	16	16	16	16	16	16
3	4	32	18	18	20	18	18	18	18	18

2	5	32	23	25	26	26	26	24	23	22
2	6	32	29	30	31	31	30	29	28	27
4	6	90	62	68	71	71	69	64	58	52
5	7	32	23	25	26	26	26	24	23	22
6	7	70	27	34	36	36	35	32	30	29
6	8	90	66	69	72	71	69	64	61	58
6	9	65	-7	-10	-12	-11	-11	-8	-9	-10
6	10	32	-4	-6	-7	-7	-6	-5	-5	-6
9	11	16	0	0	0	0	0	0	0	0
9	10	65	-7	-10	-12	-11	-11	-8	-9	-10
4	12	70	-28	-34	-36	-37	-35	-30	-24	-24
12	13	90	-86	-86	-86	-86	-86	-86	-86	-86
12	14	16	11	7	7	5	7	12	10	9
12	15	65	15	19	14	18	19	18	13	10
12	16	32	25	26	26	26	26	25	21	19
14	15	32	-5	3	0	5	4	-3	-5	-5
16	17	16	16	16	16	16	16	16	12	11
15	18	70	33	34	33	36	34	31	29	27
18	19	65	19	20	21	22	21	18	16	15
19	20	16	-5	-5	-3	-4	-5	-5	-6	-6
10	20	32	18	19	16	19	18	18	18	18
10	17	65	7	-2	-2	-7	-3	6	9	10
10	21	65	-29	-26	-26	-25	-26	-29	-30	-32
10	22	65	-23	-22	-22	-21	-22	-23	-24	-24
21	22	90	-74	-72	-73	-72	-72	-72	-71	-71
15	23	90	-37	-34	-34	-32	-34	-37	-39	-41
22	24	32	0	3	3	4	3	2	2	2
23	24	70	35	37	39	38	37	35	33	32
24	25	65	12	17	18	18	17	15	14	14
25	26	65	3	8	9	10	9	9	8	8

25	27	65	9	8	9	9	8	7	6	6
28	27	16	-1	1	1	2	2	0	-1	-2
27	29	32	19	20	20	20	20	18	18	17
27	30	32	19	20	20	21	20	19	18	17
29	30	32	8	8	8	8	8	8	7	7
8	28	16	-10	-10	-11	-10	-10	-10	-10	-9
9	28	16	9	12	12	13	12	10	9	7

Lampiran 10 Daya Transmisi Kasus 2

From	To	Kapasitas	1	2	3	4	5	6	7	8
1	2	130	68	68	68	68	68	68	68	67
1	3	32	32	32	32	32	32	32	32	32
2	4	16	16	16	16	16	16	16	16	16
3	4	32	19	19	19	19	18	18	18	17
2	5	32	21	21	21	21	21	22	20	20
2	6	32	25	25	25	25	26	26	25	26
4	6	90	45	45	45	45	47	48	45	48
5	7	32	21	21	21	21	21	22	20	20
6	7	70	26	27	26	27	28	29	24	23
6	8	90	52	53	52	53	56	58	57	61
6	9	65	-8	-10	-8	-9	-11	-12	-10	-10
6	10	32	-5	-6	-5	-5	-6	-7	-6	-6
9	11	16	0	0	0	0	0	0	0	0
9	10	65	-8	-10	-8	-9	-11	-12	-10	-10
4	12	70	-26	-27	-26	-26	-29	-31	-28	-33
12	13	90	-75	-75	-75	-75	-81	-86	-78	-86
12	14	16	7	8	7	8	8	9	8	7
12	15	65	8	8	8	9	10	10	7	8
12	16	32	20	20	20	19	20	21	21	24
14	15	32	-5	-5	-5	-4	-4	-4	-5	-4
16	17	16	13	12	13	12	12	13	12	15
15	18	70	27	27	27	26	28	29	28	32
18	19	65	16	16	16	15	16	17	17	20
19	20	16	-3	-4	-3	-4	-4	-5	-4	-3
10	20	32	14	15	14	15	16	16	16	15
10	17	65	6	7	6	7	7	7	8	6
10	21	65	-25	-28	-25	-27	-30	-32	-29	-28
10	22	65	-20	-21	-20	-21	-23	-24	-23	-23

21	22	90	-61	-64	-61	-63	-68	-71	-68	-70
15	23	90	-40	-40	-40	-38	-39	-39	-38	-37
22	24	32	-4	-2	-4	-1	0	1	-2	-3
23	24	70	34	33	34	31	33	33	32	35
24	25	65	12	13	12	12	14	14	11	12
25	26	65	7	7	7	7	8	7	3	2
25	27	65	5	5	5	5	6	8	8	10
28	27	16	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-5	-4
27	29	32	15	16	15	15	16	17	17	18
27	30	32	15	16	15	15	16	17	17	18
29	30	32	6	6	6	6	7	7	7	7
8	28	16	-9	-9	-9	-9	-9	-10	-10	-10
9	28	16	5	5	5	5	6	6	5	6
From	To	Kapasitas	9	10	11	12	13	14	15	16
1	2	130	61	70	71	72	72	70	61	66
1	3	32	27	30	29	28	28	30	27	32
2	4	16	12	11	10	9	9	11	11	16
3	4	32	11	13	12	13	12	13	10	15
2	5	32	10	7	1	0	1	5	8	15
2	6	32	19	18	15	14	15	18	18	24
4	6	90	36	34	27	26	27	31	33	39
5	7	32	10	7	1	0	1	5	8	15
6	7	70	-2	-13	-28	-31	-28	-20	-9	5
6	8	90	64	65	65	63	64	67	66	65
6	9	65	-8	-4	0	2	0	-2	-6	-7
6	10	32	-4	-2	0	1	0	-1	-4	-4
9	11	16	0	0	0	0	0	0	0	0
9	10	65	-8	-4	0	2	0	-2	-6	-7
4	12	70	-32	-28	-25	-22	-25	-27	-31	-28
12	13	90	-78	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75

12	14	16	6	6	6	7	6	6	5	6
12	15	65	-4	-4	-2	2	-1	-4	-7	-1
12	16	32	25	25	26	25	25	26	25	23
14	15	32	-10	-10	-9	-8	-9	-10	-11	-9
16	17	16	16	16	16	16	16	16	16	14
15	18	70	36	37	36	35	36	37	37	35
18	19	65	23	23	23	22	23	24	24	21
19	20	16	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-3
10	20	32	14	14	15	14	14	15	14	17
10	17	65	7	7	7	6	7	8	8	9
10	21	65	-26	-22	-19	-16	-19	-21	-26	-29
10	22	65	-21	-19	-17	-15	-17	-19	-21	-23
21	22	90	-70	-67	-64	-59	-63	-67	-71	-74
15	23	90	-31	-26	-22	-22	-21	-21	-25	-32
22	24	32	-10	-13	-16	-17	-15	-13	-11	-8
23	24	70	33	30	25	24	25	26	30	31
24	25	65	1	-6	-14	-14	-12	-10	-4	0
25	26	65	-24	-34	-49	-50	-48	-42	-32	-17
25	27	65	25	29	35	36	36	32	28	17
28	27	16	-6	-6	-7	-6	-5	-7	-7	-9
27	29	32	19	19	19	18	19	20	19	19
27	30	32	19	19	19	18	19	20	20	19
29	30	32	8	8	8	8	8	8	8	8
8	28	16	-11	-12	-12	-11	-11	-12	-12	-12
9	28	16	6	5	4	5	6	5	5	3
From	To	Kapasitas	17	18	19	20	21	22	23	24
1	2	130	66	66	66	66	66	67	67	68
1	3	32	32	32	32	32	32	32	32	32
2	4	16	16	16	16	16	16	16	16	16
3	4	32	16	15	14	15	15	16	17	18

2	5	32	22	24	21	22	24	23	23	22
2	6	32	26	27	27	27	27	27	26	26
4	6	90	51	55	51	53	55	53	51	47
5	7	32	22	24	21	22	24	23	23	22
6	7	70	28	35	23	29	36	33	31	29
6	8	90	66	68	72	70	68	64	60	58
6	9	65	-14	-19	-17	-18	-19	-15	-13	-13
6	10	32	-8	-11	-10	-10	-11	-9	-8	-7
9	11	16	0	0	0	0	0	0	0	0
9	10	65	-14	-19	-17	-18	-19	-15	-13	-13
4	12	70	-39	-44	-42	-43	-44	-40	-36	-31
12	13	90	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-83	-86
12	14	16	-6	-16	-16	-16	-16	-6	3	6
12	15	65	-17	-56	-65	-65	-58	-14	5	7
12	16	32	25	26	26	26	26	25	24	21
14	15	32	-3	-16	-21	-21	-17	-1	0	-3
16	17	16	16	16	16	16	16	16	15	12
15	18	70	39	48	51	51	49	38	32	29
18	19	65	26	35	37	37	35	25	20	17
19	20	16	2	9	11	11	10	2	-2	-4
10	20	32	12	4	4	3	4	11	15	16
10	17	65	7	8	9	9	8	6	6	8
10	21	65	-31	-32	-31	-31	-32	-31	-31	-32
10	22	65	-25	-25	-25	-25	-25	-24	-24	-25
21	22	90	-76	-78	-79	-79	-78	-74	-72	-72
15	23	90	-30	-20	-17	-17	-19	-30	-36	-39
22	24	32	-4	-6	-7	-7	-6	-2	0	1
23	24	70	42	51	54	53	52	42	37	34
24	25	65	16	22	23	23	22	19	16	15
25	26	65	3	8	10	10	9	9	8	8

25	27	65	12	13	13	13	13	10	8	7
28	27	16	-4	-4	-2	-2	-3	-3	-3	-4
27	29	32	19	20	21	20	20	18	18	17
27	30	32	19	20	21	21	20	19	18	17
29	30	32	8	8	8	8	8	8	7	7
8	28	16	-11	-11	-11	-11	-11	-10	-10	-10
9	28	16	7	8	10	9	8	8	7	6

Lampiran 11 Daya Transmisi Kasus 3

From	To	Kapasitas	1	2	3	4	5	6	7	8
1	2	130	-2	-1	-2	-2	-1	-1	-1	0
1	3	32	2	1	2	2	1	1	1	0
2	4	16	0	-1	0	0	-2	-2	-1	-3
3	4	32	-12	-12	-12	-12	-13	-14	-13	-15
2	5	32	12	12	12	12	13	12	11	11
2	6	32	7	7	7	7	6	5	6	5
4	6	90	32	32	32	32	33	34	31	33
5	7	32	12	12	12	12	13	12	11	11
6	7	70	34	35	34	34	37	38	32	33
6	8	90	51	52	51	51	54	56	55	59
6	9	65	-29	-30	-29	-29	-32	-34	-31	-34
6	10	32	-16	-17	-16	-16	-18	-19	-18	-19
9	11	16	0	0	0	0	0	0	0	0
9	10	65	-29	-30	-29	-29	-32	-34	-31	-34
4	12	70	-59	-61	-59	-60	-65	-68	-62	-68
12	13	90	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
12	14	16	-5	-10	-5	-6	1	1	1	0
12	15	65	-18	-29	-18	-20	-46	-47	-47	-49
12	16	32	24	24	24	24	24	24	24	25
14	15	32	-5	-6	-5	-5	-32	-32	-32	-32
16	17	16	16	16	16	16	16	16	16	16
15	18	70	35	38	35	35	42	44	42	46
18	19	65	24	27	24	25	31	32	31	33
19	20	16	5	7	5	5	10	11	10	11
10	20	32	6	4	6	6	1	1	2	2
10	17	65	2	3	2	3	1	-3	4	-4
10	21	65	-38	-38	-38	-38	-38	-37	-39	-37
10	22	65	-27	-28	-27	-28	-28	-27	-28	-27

21	22	90	-74	-75	-74	-74	-76	-76	-77	-78
15	23	90	-31	-29	-31	-31	-24	-23	-25	-22
22	24	32	-4	-5	-4	-4	-7	-7	-9	-9
23	24	70	42	44	42	42	49	50	48	50
24	25	65	20	21	20	20	23	23	20	21
25	26	65	7	7	7	7	8	7	3	2
25	27	65	13	14	13	13	15	16	17	19
28	27	16	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-14	-14
27	29	32	15	16	15	15	16	17	17	18
27	30	32	15	16	15	15	16	17	17	18
29	30	32	6	6	6	6	7	7	7	7
8	28	16	-11	-11	-11	-11	-11	-12	-12	-12
9	28	16	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-1
From	To	Kapasitas	9	10	11	12	13	14	15	16
1	2	130	-2	-3	-2	-1	-2	-3	-2	-1
1	3	32	2	3	2	1	2	3	2	1
2	4	16	0	1	-1	-1	-1	1	0	-2
3	4	32	-14	-14	-15	-14	-14	-14	-14	-15
2	5	32	3	1	-5	-6	-5	-1	1	6
2	6	32	5	5	2	1	2	5	5	4
4	6	90	21	18	12	10	11	16	19	26
5	7	32	3	1	-5	-6	-5	-1	1	6
6	7	70	2	-7	-23	-26	-23	-15	-4	14
6	8	90	62	63	64	61	62	65	64	64
6	9	65	-22	-19	-16	-13	-15	-17	-22	-29
6	10	32	-13	-11	-9	-8	-9	-10	-12	-17
9	11	16	0	0	0	0	0	0	0	0
9	10	65	-22	-19	-16	-13	-15	-17	-22	-29
4	12	70	-53	-50	-47	-44	-46	-48	-53	-63
12	13	90	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75

12	14	16	-8	-6	-5	-5	-5	-6	-8	2
12	15	65	-21	-19	-18	-14	-16	-19	-25	-45
12	16	32	25	25	26	25	25	26	26	26
14	15	32	-3	-4	-5	-3	-4	-5	-6	-32
16	17	16	16	16	16	16	16	16	16	16
15	18	70	40	40	40	38	39	40	41	46
18	19	65	27	27	26	25	26	27	28	33
19	20	16	3	2	2	2	2	2	3	8
10	20	32	10	11	11	11	11	12	10	5
10	17	65	7	7	7	6	7	8	7	0
10	21	65	-38	-36	-33	-29	-31	-34	-38	-37
10	22	65	-29	-28	-26	-23	-25	-27	-29	-28
21	22	90	-82	-81	-78	-72	-75	-80	-83	-82
15	23	90	-33	-29	-25	-21	-26	-29	-33	-25
22	24	32	-13	-14	-17	-17	-17	-16	-15	-13
23	24	70	38	34	30	26	30	34	38	46
24	25	65	3	-2	-9	-12	-9	-5	1	11
25	26	65	-26	-34	-49	-50	-48	-42	-32	-17
25	27	65	29	32	40	38	38	36	33	27
28	27	16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16
27	29	32	19	19	19	18	19	20	19	19
27	30	32	19	19	19	18	19	20	20	19
29	30	32	8	8	8	8	8	8	8	8
8	28	16	-13	-13	-13	-13	-13	-14	-14	-14
9	28	16	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2
From	To	Kapasitas	17	18	19	20	21	22	23	24
1	2	130	1	4	3	4	5	1	0	-1
1	3	32	-1	-4	-3	-4	-5	-1	0	1
2	4	16	-6	-8	-6	-6	-8	-6	-4	-2
3	4	32	-17	-5	-3	-4	-5	-17	-15	-14

2	5	32	12	14	16	16	15	14	13	13
2	6	32	4	5	8	7	6	5	5	5
4	6	90	45	57	61	60	58	47	39	35
5	7	32	12	14	16	16	15	14	13	13
6	7	70	38	45	47	47	46	43	41	38
6	8	90	64	67	71	69	67	62	59	56
6	9	65	-34	-34	-35	-35	-34	-35	-35	-34
6	10	32	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-19
9	11	16	0	0	0	0	0	0	0	0
9	10	65	-34	-34	-35	-35	-34	-35	-35	-34
4	12	70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-68
12	13	90	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
12	14	16	0	-1	-4	-4	-2	1	1	2
12	15	65	-49	-52	-57	-57	-53	-48	-48	-45
12	16	32	25	26	26	26	26	25	25	24
14	15	32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32
16	17	16	16	16	16	16	16	16	16	16
15	18	70	48	51	53	52	51	47	46	43
18	19	65	35	37	38	38	37	34	33	32
19	20	16	11	11	12	12	12	11	11	10
10	20	32	2	2	2	2	2	2	1	1
10	17	65	-12	-16	-16	-16	-16	-12	-8	-4
10	21	65	-33	-31	-29	-30	-31	-33	-35	-37
10	22	65	-26	-25	-24	-24	-25	-26	-27	-27
21	22	90	-78	-77	-78	-78	-77	-77	-76	-76
15	23	90	-19	-16	-14	-14	-16	-19	-21	-23
22	24	32	-7	-5	-5	-5	-5	-5	-6	-6
23	24	70	52	55	57	56	55	53	51	50
24	25	65	23	26	28	28	27	26	25	24
25	26	65	3	8	10	10	9	9	8	8

25	27	65	20	18	18	18	18	17	17	16
28	27	16	-11	-8	-7	-7	-8	-10	-11	-12
27	29	32	19	20	21	20	20	18	18	17
27	30	32	19	20	21	21	20	19	18	17
29	30	32	8	8	8	8	8	8	7	7
8	28	16	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-11
9	28	16	1	4	6	5	4	2	0	-1

Lampiran 12 Energi ES Selama 24 Jam Kasus 2

Jam	1	2	3	4	5	6
ES-1	30,6	31,0	31,4	31,9	32,1	32,2
ES-2	862,7	862,0	861,3	860,7	859,7	858,7
ES-3	157,6	156,9	156,2	155,6	154,6	153,6
ES-4	204,9	194,6	184,4	174,3	163,9	153,3
Jam	7	8	9	10	11	12
ES-1	32,7	31,4	32,3	33,1	34,0	34,9
ES-2	858,1	855,0	855,0	855,0	855,0	855,0
ES-3	153,0	149,8	149,8	149,8	149,9	149,9
ES-4	143,2	130,5	121,0	111,6	102,1	92,6
Jam	13	14	15	16	17	18
ES-1	35,8	36,7	37,6	37,8	37,8	37,8
ES-2	855,0	855,0	855,0	854,1	810,8	689,3
ES-3	149,9	149,9	149,9	149,0	130,4	113,7
ES-4	83,1	73,7	64,2	53,8	57,7	105,2
Jam	19	20	21	22	23	24
ES-1	18,7	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6
ES-2	545,8	403,1	275,9	231,4	220,4	216,1
ES-3	102,0	90,5	75,2	55,3	44,2	39,9
ES-4	161,4	217,1	266,4	268,8	257,6	253,3

Lampiran 13 Energi ES selama 24 Jam Kasus 3

Jam	1	2	3	4	5	6
ES-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ES-2	2392,4	2331,7	2288,8	2243,3	2129,0	2011,5
ES-3	127,4	110,2	96,9	83,1	103,0	122,1
ES-4	14,2	20,0	11,7	5,6	11,8	15,0
Jam	7	8	9	10	11	12
ES-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ES-2	1903,2	1787,3	1780,3	1779,2	1779,2	1779,2
ES-3	141,6	158,8	138,2	120,4	103,7	87,0
ES-4	24,0	28,0	24,4	19,8	16,2	12,56
Jam	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0
ES-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ES-2	1779,2	1779,2	1769,7	1682,6	1558,0	1419,4
ES-3	70,3	53,7	35,9	54,1	70,1	84,4
ES-4	8,9	5,6	5,6	5,6	5,6	7,3
Jam	19	20	21	22	23	24
ES-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ES-2	1268,7	1118,7	977,4	849,1	724,9	609,1
ES-3	95,4	106,5	120,3	137,7	155,7	175,9
ES-4	15,6	24,6	28,0	26,8	28,0	28,0