

**PENENTUAN KAPASITAS BESS (*BATTERY ENERGY STORAGE
SYSTEM*) DENGAN PENDEKATAN *MULTIPERIOD OPTIMAL POWER
FLOW* PADA SISTEM *MICROGRID***

(Skripsi)

Oleh

JESHU PUTRA



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2019

ABSTRAK

PENENTUAN KAPASITAS BESS (*BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM*) DENGAN PENDEKATAN *MULTIPERIOD OPTIMAL POWER FLOW* PADA SISTEM *MICROGRID*

Oleh :

JESHU PUTRA

Microgrid merupakan jaringan listrik skala kecil yang umumnya terdiri dari DG (*Distributed Generation*) dan beban. DG biasanya memanfaatkan sumber energi terbarukan seperti energi matahari dan angin, sehingga ketersediannya dipengaruhi oleh kondisi alam yang tidak pasti. Pada penelitian ini, sebuah pembangkit PV (*photovoltaic*) dengan skala kecil digunakan untuk menyuplai sebuah sistem *microgrid* dengan pembangkit biomassa secara bersamaan. Ketidakpastian suplai energi pada sistem *microgrid* dapat diatasi dengan menggunakan BESS (*Battery Energi Storage System*). BESS akan menyimpan kelebihan energi dari sistem dan akan menyuplai kembali ke sistem saat dibutuhkan. Daya keluaran PV dimodelkan dengan mengakomodir ketidakpastian menggunakan distribusi probabilitas pada *solar irradiance*. Penelitian ini mengusulkan pemodelan optimasi kapasitas BESS dengan pendekatan *multiperiod optimal power flow*. Metode optimasi yang digunakan adalah *linear programming* dengan fungsi objektif adalah meminimalkan daya dari generator dan ukuran BESS. Pendekatan fungsi kepadatan probabilitas distribusi Beta digunakan untuk memodelkan ketidakpastian *solar irradiance*. Pemodelan optimasi disimulasikan menggunakan bahasa pemrograman Python. Untuk menguji program, digunakan sistem 16 bus Desa Margosari dan *CIGRE Benchmark Low Voltage : American Topology* dengan pola penyinaran *solar irradiance* diasumsikan berbeda-beda (5 pola). Pemodelan yang diusulkan dapat menghitung ukuran optimal BESS pada sistem yang disimulasikan dengan pola penyinaran yang berbeda-beda.

Kata kunci : *Microgrid, Photovoltaic, BESS, Multiperiod optimal power flow, Linear programming, Distribusi Beta*

ABSTRACT

DETERMINING OF BESS CAPACITY (*BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM*) WITH *MULTIPERIOD OPTIMAL POWER FLOW* APPROACH FOR *MICROGRID* SYSTEM

Oleh :

JESHU PUTRA

A microgrid is a small scale electricity network which generally consists of DG (Distributed Generation) and loads. This DG usually utilizes renewable energy source, e.g. solar and wind energy, and hence its availability is significantly influenced by uncertain natural conditions. In this research, a small photovoltaic (PV) power generation unit is considered to supply a microgrid system together with a biomass generator. Uncertainty in the energy supply of a microgrid system is overcome by introducing battery energy storage system (BESS). BESS will save the excess energy from the system and will supply it back to the system when needed. PV power output is modeled by accommodating uncertainty via probability distribution of solar irradiance. This study proposes modeling of BESS capacity optimization with the multiperiod optimal power flow approach. The optimization method used is linear programming with an objective function is to minimize the power from the generator and the size of the BESS. The approach to the probability distribution function of the Beta distribution is used to modelling solar irradiance uncertainty. Optimization modeling is simulated using the Python programming language. To test the program, the 16 buses of Margosari village and CIGRE Benchmark Low Voltage: American Topology systems using solar irradiance radiation patterns are assumed to be different (5 patterns). The proposed modeling can calculate the optimal size of BESS in a simulated system with different irradiation patterns.

Keyword : Microgrid, Photovoltaic, BESS, Multiperiod optimal power flow, Linear programming, Beta Distribution

**PENENTUAN KAPASITAS BESS (BATTERY ENERGY STORAGE
SYSTEM) DENGAN PENDEKATAN MULTIPERIOD OPTIMAL POWER
FLOW PADA SISTEM MICROGRID**

Oleh

JESHU PUTRA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

Judul Skripsi : **PENENTUAN KAPASITAS BESS
(*BATTERY ENERGY STORAGE
SYSTEM*) DENGAN PENDEKATAN
MULTIPERIOD OPTIMAL POWER
FLOW PADA SISTEM MICROGRID**

Nama Mahasiswa : **Jeshu Putra**

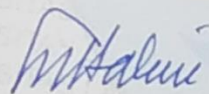
Nomor Pokok Mahasiswa : 1515031054

Jurusan : Teknik Elektro

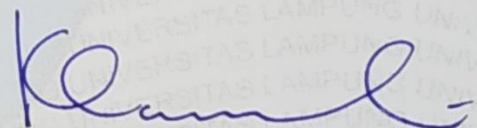
Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

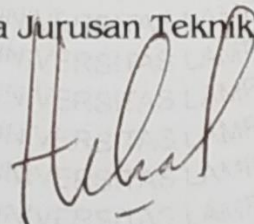


Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.
NIP 19720923 200012 1 002



Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D., Eng.
NIP 19700719 200012 1 001

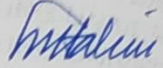
2. Ketua Jurusan Teknik Elektro



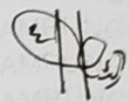
Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T.
NIP 19711130 199903 1 003

MENGESAHKAN

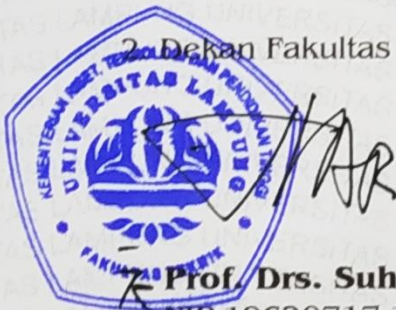
1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.** 

Sekretaris : **Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D., Eng.** 

Penguji
Bukan Pembimbing : **Herri Gusmedi, S.T., M.T.** 

2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Drs. Suharno, M.Sc., Ph.D.
NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **15 November 2019**

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 15 November 2019



Jeshu Putra
NPM. 1515031054

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Tanjung Harapan, 6 Juni 1997. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Noven Sapta Putra dan Ibu Masnunah.

Pendidikan penulis SDN 1 Cabang Empat pada tahun 2003 hingga 2009, SMP Pelita pada tahun 2009 hingga 2012, dan SMAN 3 Kotabumi pada tahun 2012 hingga 2015.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2015 melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri). Selama menjadi mahasiswa, penulis berkesempatan menjadi asisten dosen mata kuliah Menggambar Teknik dari tahun 2017 dan tergabung dalam keanggotaan asisten Laboratorium Sistem Tenaga Elektrik dari tahun 2017, serta menjadi asisten mata kuliah Praktikum Analisa Sistem Tenaga pada tahun 2018. Selain itu, penulis tergabung dalam lembaga kemahasiswaan yang ada di Jurusan Teknik Elektro (Himatro) sebagai sekretaris Departemen Pendidikan dan Pengembangan Diri selama satu periode kepengurusan yaitu pada tahun 2016-2017 dan pada periode kedua sebagai Kepala Departemen Kaderisasi pada tahun 2017. Pada 8 Agustus – 14 September 2018, penulis melaksanakan kerja praktik di PT. Bukit Asam Tbk. Unit Pelabuhan Tarahan dan mengangkat judul “Sistem Eksitasi Menggunakan AVR pada Generator Unit 1 PLTU 2x8 MW PT. Bukit Asam Tbk. Unit Pelabuhan Tarahan.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Alhamdulillah, Atas Izin Allah yang Maha Kuasa

KARYA INI KUPERSEMBAHKAN UNTUK

Ayah dan Ibu Tercinta

Noven Sapta Putra dan Masnunah

Adik Tersayang

Shifa Putri

Keluarga Besar, Dosen, Teman dan Almamater



MOTTO

“Dan barang siapa yang bertakwa kepada Allah, niscaya Allah menjadikan baginya kemudahan dalam urusannya”

(Q.S. At- Talaq : 4)

“Ada dua kenikmatan yang dilalaikan oleh kebanyakan orang, yaitu kesehatan dan waktu yang kosong”

(H.R. Bukhori)

“Jika kalian berbuat baik, sesungguhnya kalian berbuat baik bagi diri kalian sendiri”

(Q.S. Al-Isra : 7)

“Jadilah seperti bintang, bersinar karena cahaya sendiri dan tetap bersinar di bagian langit manapun”

(-JP-)

SANWACANA

Segala puji bagi Allah, atas limpahan nikmat-Nya yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat dan salam senantiasa dicurahkan kepada Nabi Muhammad, suri teladan yang mampu membuka sesuatu yang terkunci, penutup dari semua yang terdahulu, penolong kebenaran dengan jalan yang benar, dan petunjuk kepada jalan-Mu yang lurus.

Tugas Akhir dengan judul “Penentuan Kapasitas BESS (*Battery Energy Storage System*) dengan Pendekatan *Multiperiod Optimal Power Flow* pada Sistem *Microgrid*” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Prof. Karomani, M.Si. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Suharno, M.Sc., Phd. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T. selaku Kepala Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc. selaku pembimbing utama dan telah memberikan bimbingan rutin, motivasi, arahan dan pandangan kehidupan kepada penulis di setiap kesempatan dengan baik dan ramah.
5. Khairudin, S.T., M.Sc., P.hD., Eng. selaku pembimbing pendamping yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan nilai-nilai kehidupan kepada penulis dengan baik dan ramah.

6. Bapak Herri Gusmedi, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun kepada penulis dalam mengerjakan skripsi ini.
7. Ibu Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan, dan bimbingan yang membangun bagi penulis dalam mempersiapkan diri menjadi seorang Sarjana Teknik.
8. Segenap Dosen di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat, wawasan, dan pengalaman bagi penulis.
9. Segenap Staff di Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik yang telah membantu penulis baik dalam hal administrasi dan hal-hal lainnya.
10. Segenap Keluarga Besar Laboratorium Sistem Tenaga Elektrik; Mas Rachman atas kerjasama dan nasihatnya selama studi; Rekan Asisten STE 2015 Arief Pance, Rafi Lunglai, Septi Kasar, Ebotpedia dan Ridwan Datar yang telah memberikan semangat untuk berjuang dan mewarnai hari-hari di lab; dan adik-adik asisten Panji, Mangasi, Yupida, Firda, Beti, Danar, Harbi, Redho, Yoel, Oazy, Naufal, Salwa dan Chantika yang telah banyak membantu penulis, kuliah yang serius.
11. Angkatan tercinta EIE 2015 terima kasih sudah menjadi seperti saudara kandung dan atas segala bentuk kebaikan yang selalu kalian berikan, kalian harus cepat lulus dan jangan sampai naturalisasi ke angkatan dibawah kita.
12. Keluarga Besar HIMATRO yang telah mengajarkan banyak hal dan menjadi rumah yang sangat nyaman selama kuliah. Semoga semakin LUAR BIASA.

Spesial untuk HIRO 2017, semoga hal-hal yang pernah penulis sampaikan bermanfaat dan penulis memohon maaf atas salah kata maupun perbuatan.

13. Keluarga Rumah Idaman , Anak Admin, I Got Supply dan Yanto Hasan Squad yang telah membuat penulis belajar banyak hal.
14. Nanda Putri Sazqiah, yang selalu memberikan motivasi dan semangat selama proses pengerjaan skripsi. Terima kasih banyak.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Penulis mengharapkan kritik dan saran konstruktif dari semua pihak demi kemajuan bersama. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandarlampung, November 2019

Jeshu Putra

DAFTAR ISI

HALAMAN AWAL	i
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	2
1.3 Rumusan Masalah.....	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Hipotesis	4
1.7 Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terdahulu	6
2.2 Sistem Microgrid	7
2.3 Perhitungan Aliran Daya Format Vektor	8
2.4 Pemodelan Radiasi Cahaya Matahari (<i>Solar Irradiance</i>).....	12
2.5 BESS	14
III. METODOLOGI PENELITIAN	15
3.1 Waktu dan Tempat	15
3.2 Alat dan Bahan.....	16
3.3 Metode Penelitian	16
3.4 Diagram Alir Penelitian	18
3.5 Pemodelan Optimasi dengan Pendekatan <i>Multiperiod Optimal Power Flow</i>	19
3.6 Perhitungan Daya Keluaran PLTS dengan Pendekatan Distribusi Beta. 20	
3.7 Perhitungan Aliran Daya dan Kapasitas BESS dengan <i>Multi-period Optimal Power Flow</i>	20
3.8 Diagram Alir Program	23

IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN	24
4.1. Umum	24
4.2. Pemodelan <i>Solar Irradiance</i> dalam Distribusi Beta	26
4.3. Data Studi Kasus Simulasi.....	31
4.3.1 <i>Case 16 Bus Dusun Margosari</i>	31
4.3.2 <i>Case 14 Bus CIGRE Bench Mark Low Voltage : American Topology (Residential)</i>	32
4.4 Hasil Simulasi	34
4.4.1 Simulasi <i>Case 16 Bus Dusun Margosari</i>	35
4.4.2 Hasil Simulasi 14 Bus CIGRE Bench Mark Low Voltage : American Topology (Residential)	51
V. KESIMPULAN DAN SARAN	73
5.1 Kesimpulan	73
5.2 Saran	74

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	15
Tabel 4.1 Hasil Simulasi <i>case</i> 16 Bus Dusun Margosari dengan Penyinaran Model 1	36
Tabel 4.2 Hasil Simulasi <i>case</i> 16 Bus Dusun Margosari dengan Penyinaran Model 2	39
Tabel 4.3 Hasil Simulasi <i>case</i> 16 Bus Dusun Margosari dengan Penyinaran Model 3	42
Tabel 4.4 Hasil Simulasi <i>case</i> 16 Bus Dusun Margosari dengan Penyinaran Model 4	45
Tabel 4.5 Hasil Simulasi <i>case</i> 16 Bus Dusun Margosari dengan Penyinaran Model 5	48
Tabel 4.6 Hasil Simulasi <i>Case</i> 14 Bus <i>CIGRE Bench Mark Low Voltage</i> : <i>American Topology (Residential)</i> dengan Pola Penyinaran Model 1	53
Tabel 4.7 Hasil Simulasi <i>Case</i> 14 Bus <i>CIGRE Bench Mark Low Voltage</i> : <i>American Topology (Residential)</i> dengan Pola Penyinaran Model 2	57
Tabel 4.8 Hasil Simulasi <i>Case</i> 14 Bus <i>CIGRE Bench Mark Low Voltage</i> : <i>American Topology (Residential)</i> dengan Pola Penyinaran Model 3	61
Tabel 4.9 Hasil Simulasi <i>Case</i> 14 Bus <i>CIGRE Bench Mark Low Voltage</i> : <i>American Topology (Residential)</i> dengan Pola Penyinaran Model 4	65
Tabel 4.10 Hasil Simulasi <i>Case</i> 14 Bus <i>CIGRE Bench Mark Low Voltage</i> : <i>American Topology (Residential)</i> dengan Pola Penyinaran Model 5	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem <i>Microgrid</i>	8
Gambar 2.2 Bimodal pada <i>Solar Irradiance</i>	12
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	18
Gambar 3.2 Diagram Alir Program.....	23
Gambar 4.1 PV Modul Siemens SM100.....	25
Gambar 4.2 Distribusi Beta Model 1	26
Gambar 4.3 Distribusi Beta Model 2	27
Gambar 4.4 Distribusi Beta Model 3	28
Gambar 4.5 Distribusi Beta Model 4	29
Gambar 4.6 Distribusi Beta Model 5	30
Gambar 4.7 Kurva Beban Harian <i>Case 16 Bus Dusun Margosari</i>	31
Gambar 4.8 <i>Single Line Diagram Case 16 Bus Dusun Margosari</i>	31
Gambar 4.9 Kurva Beban Harian <i>Case 14 Bus CIGRE Bench Mark Low Voltage : American Topology (Residential)</i>	32
Gambar 4.10 <i>Single Line Diagram Case 14 Bus CIGRE Bench Mark Low Voltage : American Topology (Residential)</i>	33
Gambar 4. 11 Skenario Penempatan Posisi PV dan BESS pada <i>case 16 Bus Dusun Margosari</i>	35
Gambar 4.12 Neraca Energi Selama 24 jam (untuk beban daya aktif) dengan Pola Penyinaran Model 1	37
Gambar 4.13 Energi yang Tersimpan di dalam Baterai Selama 24 Jam dengan Pola Penyinaran Model 1	38
Gambar 4.14 Neraca Energi Selama 24 jam (untuk beban daya aktif) dengan Pola Penyinaran Model 2	40

Gambar 4.15 Energi yang Tersimpan di dalam Baterai Selama 24 Jam dengan Pola Penyinaran Model 2	41
Gambar 4.16 Neraca Energi Selama 24 jam (untuk beban daya aktif) dengan Pola Penyinaran Model 3	43
Gambar 4.17 Energi yang Tersimpan di dalam Baterai Selama 24 Jam dengan Pola Penyinaran Model 3	44
Gambar 4. 18 Neraca Energi Selama 24 jam (untuk beban daya aktif) dengan Pola Penyinaran Model 4	46
Gambar 4.19 Energi yang Tersimpan di dalam Baterai Selama 24 Jam dengan Pola Penyinaran Model 4	47
Gambar 4.20 Neraca Energi Selama 24 jam (untuk beban daya aktif) dengan Pola Penyinaran Model 5	49
Gambar 4.21 Energi yang Tersimpan di dalam Baterai Selama 24 Jam dengan Pola Penyinaran Model 5	50
Gambar 4.22 Skenario Penempatan Posisi PV dan BESS <i>Case 14 Bus CIGRE Bench Mark Low Voltage : American Topology (Residential)</i>	52
Gambar 4.23 Neraca Energi Selama 24 jam (untuk beban daya aktif) dengan Pola Penyinaran Model 1	54
Gambar 4.24 Neraca Energi Selama 24 jam (untuk beban daya reaktif) dengan Pola Penyinaran Model 1	55
Gambar 4.25 Energi yang Tersimpan di dalam Baterai Selama 24 jam dengan Pola Penyinaran Model 1	56
Gambar 4.26 Neraca Energi Selama 24 jam (untuk beban daya aktif) dengan Pola Penyinaran Model 2	58
Gambar 4.27 Neraca Energi Selama 24 jam (untuk beban daya reaktif) dengan Pola Penyinaran Model 2	59
Gambar 4.28 Energi yang Tersimpan di dalam Baterai Selama 24 jam dengan Pola Penyinaran Model 2	60
Gambar 4.29 Neraca Energi Selama 24 jam (untuk beban daya aktif) dengan Pola Penyinaran Model 3	62
Gambar 4.30 Neraca Energi Selama 24 jam (untuk beban daya reaktif) dengan Pola Penyinaran Model 3	63

Gambar 4.31 Energi yang Tersimpan di dalam Baterai Selama 24 jam dengan Pola Penyinaran Model 3	64
Gambar 4.32 Neraca Energi Selama 24 jam (untuk beban daya aktif) dengan Pola Penyinaran Model 4	66
Gambar 4.33 Neraca Energi Selama 24 jam (untuk beban daya reaktif) dengan Pola Penyinaran Model 4	67
Gambar 4.34 Energi yang Tersimpan di dalam Baterai Selama 24 jam dengan Pola Penyinaran Model 4	68
Gambar 4.35 Neraca Energi Selama 24 jam (untuk beban daya aktif) dengan Pola Penyinaran Model 5	70
Gambar 4.36 Neraca Energi Selama 24 jam (untuk beban daya reaktif) dengan Pola Penyinaran Model 5	71
Gambar 4. 37 Energi yang Tersimpan di dalam Baterai Selama 24 jam dengan Pola Penyinaran Model 5	72

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Microgrid merupakan suatu jaringan listrik aktif dengan skala kecil yang terdiri dari *distributed generator* (DG) dan berbagai beban dengan tingkatan tegangan distribusi[1]. Pada sistem *microgrid*, DG ditempatkan di dekat beban sehingga beban dilayani oleh DG dan mengurangi rugi-rugi saluran yang cukup besar jika beban terletak jauh dari pembangkit listrik utama. Pada *microgrid*, pembangkitan energi listrik biasanya menggunakan sumber energi terbarukan yang memiliki biaya pembangkitan yang murah. Namun, ketersediaannya dipengaruhi ketidakpastian kondisi alam sehingga ketersediaan energi juga tidak pasti sepanjang waktu. Salah satu sumber energi terbarukan yang populer adalah energi cahaya matahari untuk sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Daya yang dihasilkan oleh PLTS dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari yang tidak selalu sama nilainya setiap waktu, sehingga, penggunaan PLTS pada *microgrid* memiliki kendala dalam kontinuitas ketersediaan daya.

Ketidakpastian tersedianya sumber energi dapat diatasi dengan melakukan pengaturan jadwal pembangkitan (*scheduling generation*) dan memasang perangkat penyimpanan energi berupa baterai pada sistem atau BESS (*battery energy storage system*). Untuk mengatasi hal tersebut, beberapa peneliti

mengembangkan solusi yaitu melakukan optimasi pada sistem *microgrid* yang bertujuan mendapatkan biaya operasi pembangkitan yang optimal. Selain itu juga dikembangkan penelitian tentang optimalisasi ukuran perangkat penyimpanan energi atau BESS dengan menggunakan berbagai metode optimasi dan perangkat lunak yang bervariasi.

Pengembangan penelitian terkait optimasi kapasitas BESS harus terus dilakukan karena teknologi BESS memiliki peran yang sangat penting dalam meningkatkan keandalan suatu sistem *microgrid*. Oleh karena itu, penulis akan melakukan penelitian tentang penentuan kapasitas BESS dengan pendekatan *multiperiod optimal power flow* pada sistem *microgrid* untuk mendapatkan kapasitas optimal BESS untuk sistem *microgrid* yang memiliki PLTS.

1.2 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kapasitas *Battery Energy Storage System* (BESS) dengan pendekatan *multiperiod optimal power flow*. Untuk itu perlu membuat model optimasi ukuran kapasitas BESS agar didapat nilai kapasitas BESS optimal beserta aliran daya pada *microgrid*.

1.3 Rumusan Masalah

Penentuan kapasitas optimal dari BESS dapat dilakukan menggunakan berbagai metode. Dalam hal ini, penelitian fokus pada penggunaan teknik optimasi menggunakan *linier programming optimal power flow* untuk mendapatkan ukuran

BESS dan aliran daya optimal. Karena penggunaan energi secara berkelanjutan merupakan fungsi waktu sehingga pendekatan *multi-period optimal power flow* digunakan dalam penelitian ini.

Energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS dipengaruhi faktor ketidakpastian intensitas radiasi cahaya matahari dalam setiap waktu sehingga dalam penelitian ini dilakukan pendekatan menggunakan *probability density function* agar keluaran daya PLTS dapat diprediksi dengan lebih akurat.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. *Multiperiod optimal power flow* dalam penelitian ini hanya pada kondisi operasi *steady state*.
2. Pembangkit biomassa selalu terhubung dan tidak ada pelepasan beban selama simulasi.
3. Data *solar irradiance* menggunakan data terbuka milik IEEE.
4. Rentang periode simulasi adalah 1 hari atau 24 jam.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat pada penelitian ini adalah :

1. Memberikan pemahaman kepada penulis tentang optimasi aliran daya menggunakan *linear programming optimal power flow* (LPOPF) dan *multiperiod optimal power flow*.

2. Memberikan pemahaman kepada penulis tentang cara menyelesaikan persamaan linier dan aliran daya menggunakan algoritma dan pemrograman.
3. Dapat menjadi referensi dalam investasi BESS pada sistem *microgrid*.
4. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang ingin mengembangkan penelitian ini.

1.6 Hipotesis

Ukuran kapasitas BESS pada suatu *microgrid* dapat dioptimasi menggunakan metode optimasi *linier programming optimal power flow* dengan menggunakan pendekatan *multiperiod optimal power flow*. Program *Linier Programming Optimal Power Flow* (LPOPF) yang telah dibuat sebelumnya dapat dikembangkan untuk menjadi *multiperiod optimal power flow* sehingga sehingga bisa menghitung nilai kapasitas optimal BESS dan mengetahui aliran daya *microgrid* lebih dari satu waktu.

1.7 Sistematika Penulisan

Agar penulisan laporan ini tidak menyimpang dari tujuan dan judul maka sistematika penulisan adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab ini menguraikan tentang latar belakang, tujuan ,rumusan masalah, batasan masalah, manfaat,hipotesis,sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

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

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi uraian materi tentang waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, metode penelitian yang digunakan, serta pelaksanaan dan pengamatan penelitian

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan hasil data penelitian dan pembahasan dari tugas akhir ini.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi kesimpulan yang didapat dari penelitian ini dan saran untuk penelitian selanjutnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terkait aliran daya optimal pada sistem tenaga listrik yang terpasang BESS telah dilakukan sebelumnya. Penelitian yang dilakukan oleh Chandy *et al* [2] telah memformulasikan perhitungan aliran daya optimal dengan studi kasus satu generator dan satu beban serta ditambah dengan baterai. Pada penelitian ini baterai menjadi beban pada kondisi awal dan pada waktu tertentu baterai menjadi penyuplai daya. Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Levron *et al* [3] yang memodelkan formulasi perhitungan aliran daya pada sistem *microgrid* untuk mengoptimalkan penggunaan daya dari *grid* dengan 2 unit baterai. Pada penelitian ini sistem *microgrid* yang digunakan memiliki dua PLTS dan terhubung ke jaringan (*on grid*). Perhitungan pada penelitian ini menggunakan pendekatan *dynamic programming* dan metode *Gauss-siedel*. Wang *et al* [4] melakukan penelitian yang berhasil memodelkan optimasi aliran daya pada suatu jaringan listrik dengan studi kasus IEEE 30 bus menggunakan pendekatan *multi-period optimal power flow*. Fungsi objektif dari penelitian ini adalah mengoptimalkan *cost generation* dengan mempertimbangkan SOC pada baterai tiap satu waktu. Pada penelitian ini BESS sebagai beban pada saat *cost generation* murah dan sebagai penyuplai saat *cost generation* mahal. Sedangkan Kim [5] juga melakukan

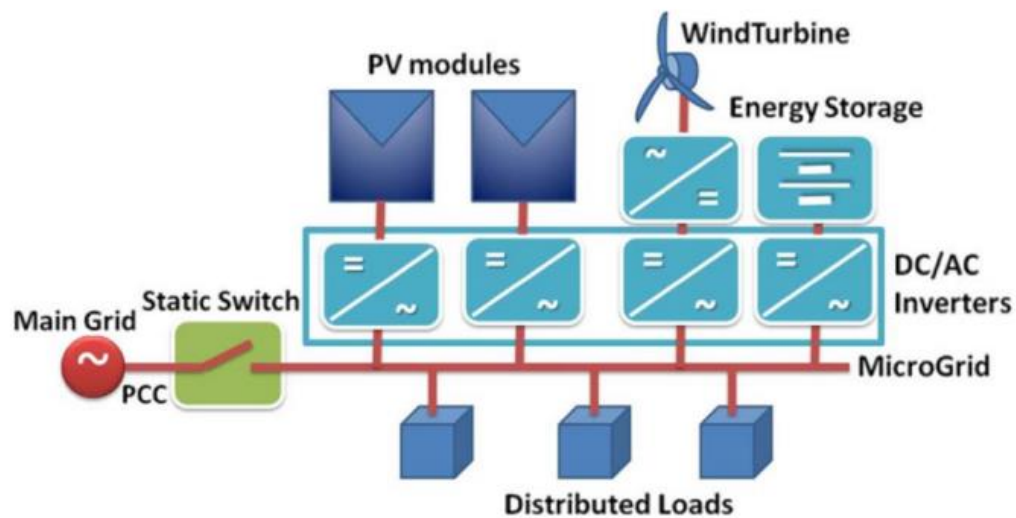
penelitian yang mengajukan algoritma untuk menghitung aliran daya optimal dengan studi kasus CIGRE-IEEE DER *medium voltage network* yang dipasang BESS sehingga didapatkan jadwal pembangkitan yang optimal. Fungsi objektif dari penelitian ini juga meminimalkan *cost generation*.

Penelitian yang dilakukan oleh Wang [4] dan Kim [5] telah berhasil menemukan formula untuk menghitung aliran daya dan jadwal operasi pembangkit pada sebuah jaringan distribusi yang dengan menggunakan metode *multi-period optimal power flow* dengan *state of charge (SOC)* yang berubah setiap waktunya. Persamaan yang dimodelkan pada penelitian sebelumnya akan dimodifikasi pada penelitian ini. Sebelumnya, fungsi objektif adalah meminimalkan biaya pembangkitan dan kapasitas BESS ditentukan, sedangkan pada penelitian ini fungsi objektif adalah meminimalkan pembangkitan generator dan kapasitas baterai menjadi nilai yang akan dihitung.

2.2 Sistem Microgrid

Microgrid merupakan sebuah jaringan listrik dengan skala kecil yang terdiri dari kumpulan *distributed generation* (DG) dan beban yang bervariasi dengan tegangan tegangan pada tingkat jaringan distribusi. Secara umum microgrid berupa komunitas beban kecil seperti area perumahan (*residential area*), area komersil (*commercial area*) perkantoran, kampus dan area industri (*industrial area*). Suatu sistem microgrid umumnya menggunakan pembangkit sumber energi terbarukan seperti angin, biomassa, dan surya [1]. Desain dari sebuah microgrid dapat disesuaikan dengan kebutuhan seperti kapasitas daya dan tegangan untuk area tertentu. Ukuran dari pembangkit microgrid umumnya kurang dari 100 kW dan

dilengkapi dengan sistem kontrol elektronika daya [6]. *Microgrid* dapat berupa suatu sistem yang terhubung dengan jaringan distribusi (*grid connected*) dan jaringan yang independen (*isolated grid*). Modernisasi merupakan konsep yang diterapkan pada sistem microgrid, dimana terdapat sistem yang dapat memonitoring dan secara otomatis dapat mengoptimalkan proses pengoperasian [7].



Gambar 2.1 Sistem *Microbiomassa* [3]

2.3 Perhitungan Aliran Daya Format Vektor

Aliran daya suatu jaringan perlu dihitung dan dianalisa sehingga dapat diketahui aliran daya setiap bus, aliran daya di setiap saluran, nilai tegangan setiap bus dan rugi yang terjadi selama proses pengiriman daya listrik dari pembangkit sampai ke beban. Hasil analisa aliran daya dapat digunakan untuk memahami kondisi jaringan tersebut dan dapat dijadikan dasar dalam perencanaan operasi pada jaringan tersebut [8]. Metode yang umum digunakan dalam penyelesaian aliran daya antara

lain adalah *Newton-Raphson*, *Fast Decouple* dan *Gauss Siedel*. Dari ketiga metode tersebut, *Newton-Raphson* merupakan metode yang paling umum digunakan karena memiliki iterasi paling sedikit hingga mencapai tingkat konvergensi yang diinginkan [9] sehingga pada penelitian ini digunakan metode *Newton-Raphson*. Persamaan aliran daya metode *Newton-Raphson* adalah :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Elemen H, N, J, dan L merupakan elemen matriks *Jacobian*.

Penelitian [10] telah memodelkan perhitungan aliran daya dalam format *vectorized algorithm* sehingga perhitungan aliran daya lebih cepat dan lebih konvergen. Berikut adalah formula perhitungan aliran daya menggunakan format *vectorized algorithm*.

$$\bar{S}_{inj} = \bar{V} \cdot \bar{I}^* \quad (2.2)$$

\bar{V} merupakan elemen diagonal matriks tegangan dengan ukuran matriks $n_{bus} \times n_{bus}$. \bar{V} merupakan tegangan dalam bentuk bilangan kompleks yaitu :

$$\bar{V} = |V| e^{j\theta} \quad (2.3)$$

$$\bar{V} = e + jf \quad (2.4)$$

Persamaan (2.3) merupakan bentuk polar sedangkan persamaan (2.4) adalah bentuk rektangular.

\bar{I} merupakan vektor arus injeksi yang dihitung dengan persamaan berikut:

$$\bar{I} = \bar{V} \cdot Y \quad (2.5)$$

Y merupakan matriks admitansi saluran dengan ukuran matriks $n_{bus} \times n_{bus}$.
sehingga persamaan (2.2) menjadi :

$$S_{inj} = \bar{V} \cdot (\bar{V} \cdot Y)^* \quad (2.6)$$

Menghitung nilai selisih daya atau *mismatch* digunakan persamaan :

$$\Delta S = S_{sch} - S_{inj} \quad (2.7)$$

$$S_{sch} = S_{gsch} - S_{lsch} \quad (2.8)$$

S_{sch} merupakan nilai daya terjadwal yang sudah teridentifikasi pada bus tertentu.

Dalam pemodelan format vektor ΔP menjadi ΔS_{real} dan ΔP menjadi ΔS_{imag} .

Derivatif parsial S_{inj} terhadap tegangan dalam bentuk polar diturunkan terhadap magnitud tegangan ($|V|$) dan sudut fasa (θ) adalah sebagai berikut :

$$\frac{dS_{inj}}{d|V|} = \bar{I}^* \cdot \frac{\bar{V}}{|V|} + \bar{V} \cdot Y^* \cdot \frac{\bar{V}^*}{|V|} \quad (2.9)$$

$$\frac{dS_{inj}}{d\theta} = j(\bar{I}^* \cdot \bar{V} - \bar{V} \cdot Y^* \cdot \bar{V}^*) \quad (2.10)$$

Sedangkan dalam bentuk rektangular derivatif parsial S_{inj} adalah :

$$\frac{dS_{inj}}{de} = \bar{I}^* + \bar{V}.Y^* \quad (2.11)$$

$$\frac{dS_{inj}}{df} = j\bar{I}^* - j\bar{V}.Y^* \quad (2.12)$$

Hasil dari derivatif parsial dipisahkan komponen ril dan imajiner agar dapat dibentuk menjadi matriks *jacibian*. Pada model polar akan diperoleh :

$$H = \frac{dS_{inj}}{d\theta} \text{ real} \quad (2.13)$$

$$N = \frac{dS_{inj}}{d|V|} \text{ real} \quad (2.14)$$

$$J = \frac{dS_{inj}}{d\theta} \text{ imag} \quad (2.15)$$

$$L = \frac{dS_{inj}}{d|V|} \text{ imag} \quad (2.16)$$

Pada bentuk rektangular akan diperoleh :

$$H = \frac{dS_{inj}}{de} \text{ real} \quad (2.17)$$

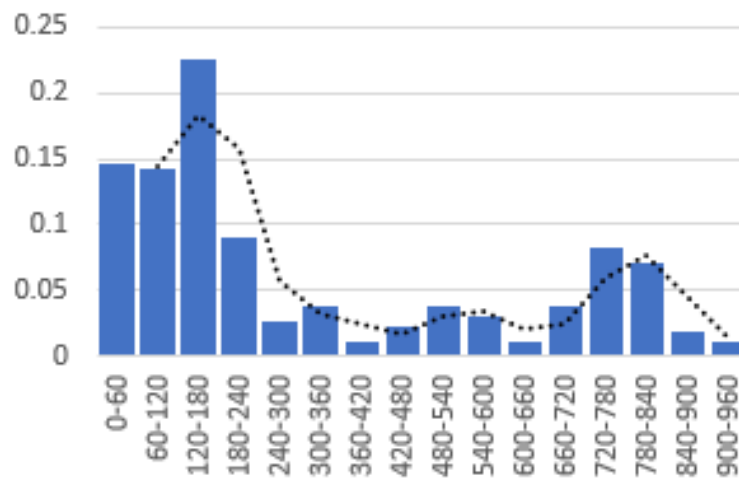
$$N = \frac{dS_{inj}}{df} \text{ real} \quad (2.18)$$

$$J = \frac{dS_{inj}}{de} \text{ imag} \quad (2.19)$$

$$L = \frac{dS_{inj}}{df} \text{ imag} \quad (2.20)$$

2.4 Pemodelan Radiasi Cahaya Matahari (*Solar Irradiance*)

Daya yang dihasilkan oleh suatu PLTS dipengaruhi oleh banyak faktor diantaranya intensitas radiasi cahaya matahari (*solar irradiance*) dan desain dari sistem PLTS itu sendiri. *Solar irradiance* sangat dipengaruhi oleh kondisi alam seperti awan, suhu dan kelembaban sehingga memiliki sifat ketidakpastian sehingga dapat dimodelkan dalam fungsi probabilitas [11],[12]. *Solar irradiance* memiliki karakteristik yang dapat dimodelkan dalam fungsi distribusi probabilitas Beta. Fungsi Beta memiliki nilai interval $[0,1]$ dan memiliki parameter bentuk α dan β yang menentukan kecendrungan bentuk kurva [13]. Umumnya *solar irradiance* akan membentuk kurva distribusi bimodal, sehingga perlu dibagi 2 kurva agar menjadi unimodal dan dapat dilakukan pendekatan menggunakan fungsi Beta [14].



Gambar 2.2 Bimodal pada *Solar Irradiance*

Berikut adalah persamaan *solar irradiance* pada distribusi Beta[12] :

$$f_S r = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{max}}\right)^{\beta-1} \quad (2.21)$$

$f_S r$ = Fungsi probabilitas Beta

Γ = Fungsi gamma

α, β = Beta parameter ($\alpha, \beta \geq 0$)

r = *solar irradiance* dalam W/M^2 ($0 \leq r \leq 1$)

Sedangkan untuk mendapatkan nilai α dan β dapat menggunakan persamaan berikut ini:

$$\alpha = \mu \left[\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \quad (2.22)$$

$$\beta = (1 - \mu) \left[\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \quad (2.23)$$

μ adalah nilai rata-rata dan σ merupakan standar deviasi dari kumpulan data. Untuk konversi nilai *solar irradiance* menjadi daya listrik digunakan persamaan berikut[13] :

$$P_v = r \cdot A \cdot \eta \quad (2.24)$$

P_v adalah daya yang dihasilkan oleh PLTS, r adalah *solar irradiance*, A adalah luas area PLTS dan η adalah efisiensi dari modul panel surya.

2.5 BESS

Renewable enegy terus meningkat penggunaannya sehingga penggunaan BESS juga terus meningkat. BESS memiliki peran penting dalam sistem tenaga listrik karena dapat mengatasi masalah ketidakpastian pada sumber *renewable enegy* sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem[12],[15]. Dalam optimasi BESS, parameter penting yang adalah nilai *State of Charge* (SOC) pada baterai yang merupakan kondisi muatan yang tersimpan di dalam baterai setelah proses *charging/discharging* [12],[16]. SOC harus berada pada rentang nilai yang seharusnya untuk menghindari penggunaan yang tidak wajar terhadap baterai atau dapat dimodelkan dalam persamaan[15] :

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (2.25)$$

SOC_{min} adalah nilai minimal SOC pada baterai, $SOC(t)$ adalah SOC pada waktu t dan SOC_{max} adalah nilai maksimal SOC pada baterai.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Perancangan dan pengerjaan tugas akhir ini dilaksanakan dari bulan Mei hingga bulan Oktober 2019 yang bertempat di Laboratorium Sistem Tenaga Elektrik (STE) Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.

Tabel 3.1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

No	Jenis Kegiatan	Bulan ke					
		1	2	3	4	5	6
1.	Studi Literatur	■					
2.	Pembuatan program		■	■			
3.	Pengujian program			■	■	■	
4.	Analisa hasil penelitian				■	■	■
5.	Penulisan laporan penelitian					■	■

3.2 Alat dan Bahan

Pada penelitian tugas akhir ini, dibutuhkan alat dan bahan yang digunakan untuk melakukan penelitian. Berikut adalah alat dan bahan yang digunakan :

1. Satu unit laptop dengan spesifikasi Intel Core i3 dengan *processor* 1.3 GHZ dan sistem operasi Windows 10 64-bit sebagai media perancangan dan simulasi program.
2. Perangkat lunak Python 3.0 sebagai sarana membuat program dan model perhitungan.
3. Perangkat lunak Sublime Text 3.1.1 Build 3176 sebagai media untuk mengedit dan menampilkan hasil simulasi
4. Data *one line diagram* 16 bus Dusun Margosari, Desa Pesawaran Indah, Pesawaran dan *CIGRE Bench Mark Low Voltage : American Topology (Residential)* sebagai *case* yang digunakan dalam penelitian ini.
5. Data radiasi cahaya matahari dari IEEE sebagai sumber daya untuk baterai.

3.3 Metode Penelitian

Berikut ini adalah metode dan langkah kerja yang dilakukan untuk menyelesaikan tugas akhir ini yaitu :

1. Studi Literatur

Studi Literatur yaitu mempelajari materi yang berkaitan dengan tugas akhir.

Meteri tersebut berasal dari berbagai referensi atau sumber – sumber ilmiah lainnya seperti jurnal ilmiah, skripsi - skripsi, buku - buku yang berkaitan

dengan tugas akhir, serta website resmi yang berhubungan dengan perangkat lunak yang digunakan.

2. Studi Bimbingan

Penulis juga melakukan studi bimbingan yaitu dengan cara berdiskusi dan tanya jawab dengan dosen pembimbing guna menambah wawasan dan menyelesaikan kendala yang terjadi saat melaksanakan tugas akhir

3. Pengambilan dan Pengolahan Data

Pada tahap ini, penulis melakukan pengambilan data yang nantinya akan diolah dan dianalisa menggunakan perangkat lunak daya yang digunakan yaitu :

1. Data *one line digaram* pada jaringan distribusi 16 bus Dusun Margosari, Desa Pesawaran Indah, Pesawaran. Data yang diolah meliputi data pembangkit, data saluran dan data beban.
2. . Data pengukuran radiasi cahaya matahari yang berasal dari data IEEE yang akan menjadi daya yang masuk ke baterai.

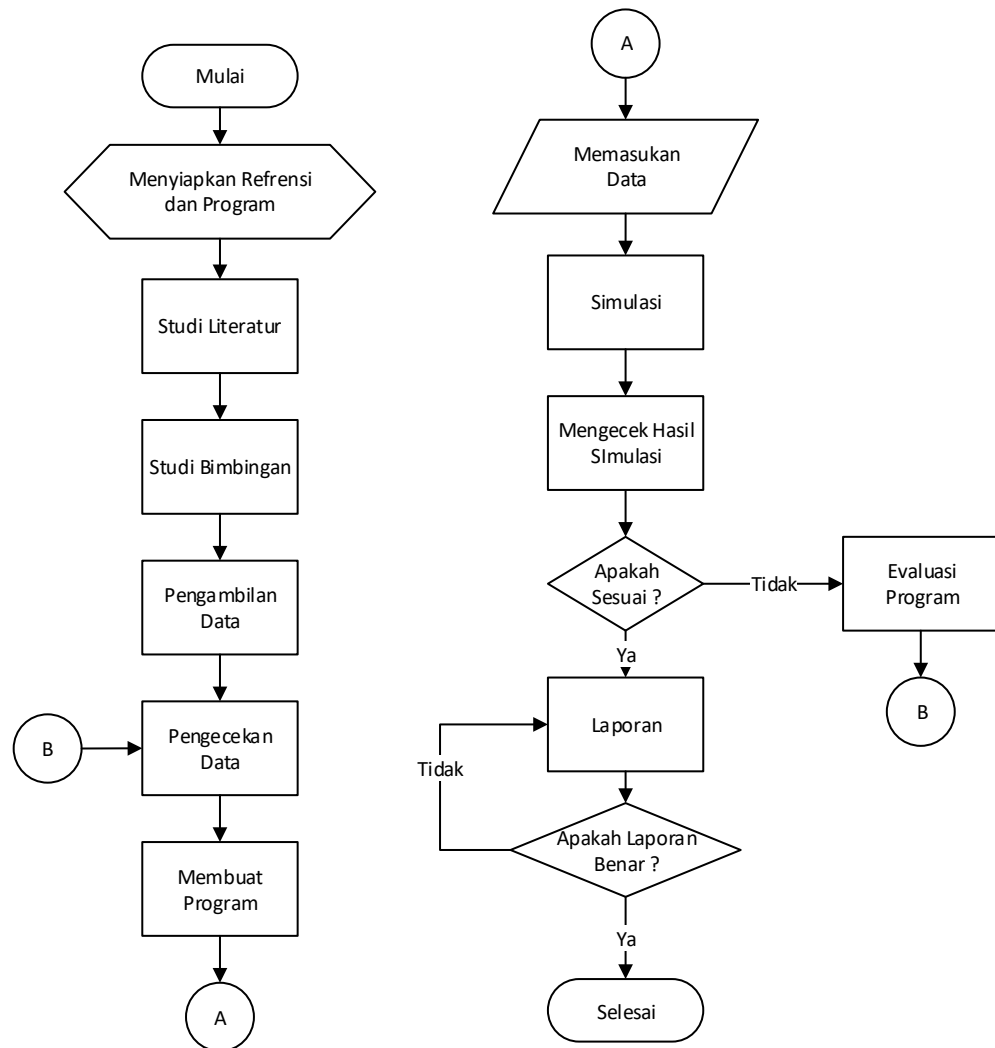
Data akan diolah dan dimasukkan ke program *multiperiod optimal power flow* yang telah dibuat sehingga dapat diketahui aliran dayanya dan ukuran kapasitas baterai yang optimal untuk sistem tersebut.

4. Pembuatan Laporan

Tahap ini berfungsi untuk menuliskan hasil yang telah didapat dan sebagai sarana pertanggungjawaban terhadap penelitian yang telah dilakukan, Laporan dibagi kedalam dua tahap, yaitu laporan awal yang digunakan untuk seminar usul penelitian dan laporan akhir yang digunakan untuk seminal hasil penelitian.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Adapun tahap-tahap yang dilakukan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.5 Pemodelan Optimasi dengan Pendekatan *Multiperiod Optimal Power Flow*

1. Fungsi objektif pada penelitian ini adalah :

$$F = \min (P_{BM}^T + Q_{BM}^T + CB) \quad (3.1)$$

P_{BM}^T adalah daya aktif dan Q_{BM}^T adalah daya reaktif yang disuplai oleh biomassa pada waktu T. CB adalah kapasitas BESS yang akan dioptimasi.

2. Sedangkan *equality constraint* pada penelitian ini adalah :

equality constraint daya :

$$P_{BM}^T + P_{BD}^T + P_{pv}^T - P_{BC}^T - P_L^T - P_{inj}^T = \Delta S_{real} \quad (3.2)$$

$$Q_{BM}^T - Q_L^T - Q_{inj}^T = \Delta S_{imag} \quad (3.3)$$

equality constraint SOC baterai:

$$E(t) = E(t - 1) + (P_{BC}^T - P_{BD}^T) \times T \quad (3.4)$$

3. *Inequality constraint* pada penelitian ini adalah :

$$\delta_{min} \leq \delta_i \leq \delta_{max} \quad (3.5)$$

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (3.6)$$

$$P_{BMmin} \leq P_{BMi} \leq P_{BMmax} \quad (3.7)$$

$$Q_{BMmin} \leq Q_{BMi} \leq Q_{BMmax} \quad (3.8)$$

$$P_{Lmin} \leq P_{Li} \leq P_{Lmax} \quad (3.9)$$

$$Q_{Lmin} \leq Q_{Li} \leq Q_{Lmax} \quad (3.10)$$

$$E(t)_{min} \leq E(t) \leq E(t)_{max} \quad (3.11)$$

$$P_{BCmin}^T \leq P_{BC}^T(t) \leq P_{BCmax}^T \quad (3.12)$$

$$P_{BDmin}^T \leq P_{BD}^T(t) \leq P_{BDmax}^T \quad (3.13)$$

$$E(t)_{max} = 0,9 \text{ CB} \quad (3.14)$$

$$E(t)_{min} = 0,3 \text{ CB} \quad (3.15)$$

3.6 Perhitungan Daya Keluaran PLTS dengan Pendekatan Distribusi Beta

Adapun tahap-tahap menghitung daya yang dihasilkan PLTS adalah sebagai berikut:

1. Memasukan nilai α dan β kedalam program agar dapat dimodelkan dalam fungsi distribusi Beta. Dengan menggunakan fungsi *random variabel* akan didapatkan nilai *solar irradiance* yang bersifat acak sehingga sesuai dengan ketidakpastian *renewable enegy*.
2. Menghitung daya yang dihasilkan PLTS berdasarkan nilai *solar irradiance* dengan menggunakan persamaan (2.24).

3.7 Perhitungan Aliran Daya dan Kapasitas BESS dengan *Multi-period*

Optimal Power Flow

Adapun tahap-tahap untuk menghitung aliran daya pada penelitian ini adalah :

1. Mengubah data ke dalam format yang dapat dibaca oleh program.
2. Menentukan jumlah jam simulasi

3. Menghitung dan membuat matriks admitansi (Y_{bus}) dari data yang dimasukan. Nilai matriks (Y_{bus}) dihitung menggunakan nilai impedansi saluran dengan rumus $Y=1/Z$. Admitansi direpresentasikan sebagai Y_{ij} , yaitu admitansi dari bus i yang terhubung ke bus j , sehingga dapat ditulis seperti persamaan berikut ini :

$$[Y_{bus}] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1j} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ij} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

4. Menentukan nilai awal untuk magnitudo tegangan ($|V|^0$) dan sudut fasa (θ^0). Nilai magitudo tegangan dan sudut fasa pada iterasi awal adalah $1.0 \text{ per unit (p.u)}$ untuk *slack bus* dan *PQ bus*.
5. Menentukan nilai iterasi $n=0$.
6. Menghitung *mismatch* ΔS_{real} dan ΔS_{imag} menggunakan persamaan (3.2) dan (3.3). Kemudian program akan mengecek kesesuaian nilai *missmatch* dengan batas toleransi yang ditentukan. Jika nilai *missmatch* sudah sesuai maka program akan menuju langkah ke-8. Jika belum sesuai maka program akan membentuk matriks *jacobian* yang menghasilkan elemen H,N,J dan L yang data dihitung menggunakan persamaan (2.13),(2.14),(2.15), dan (2.16).
7. Menghitung tegangan baru dan menambah nilai interasi $n+1$. Tegangan pada iterasi $n+1$ dihitung dengan menyelesaikan persamaan berikut ini :

$$\begin{bmatrix} \Delta S_{real} \\ \Delta S_{imag} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Diubah menjadi :

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta S_{real} \\ \Delta S_{imag} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Nilai tegangan baru adalah :

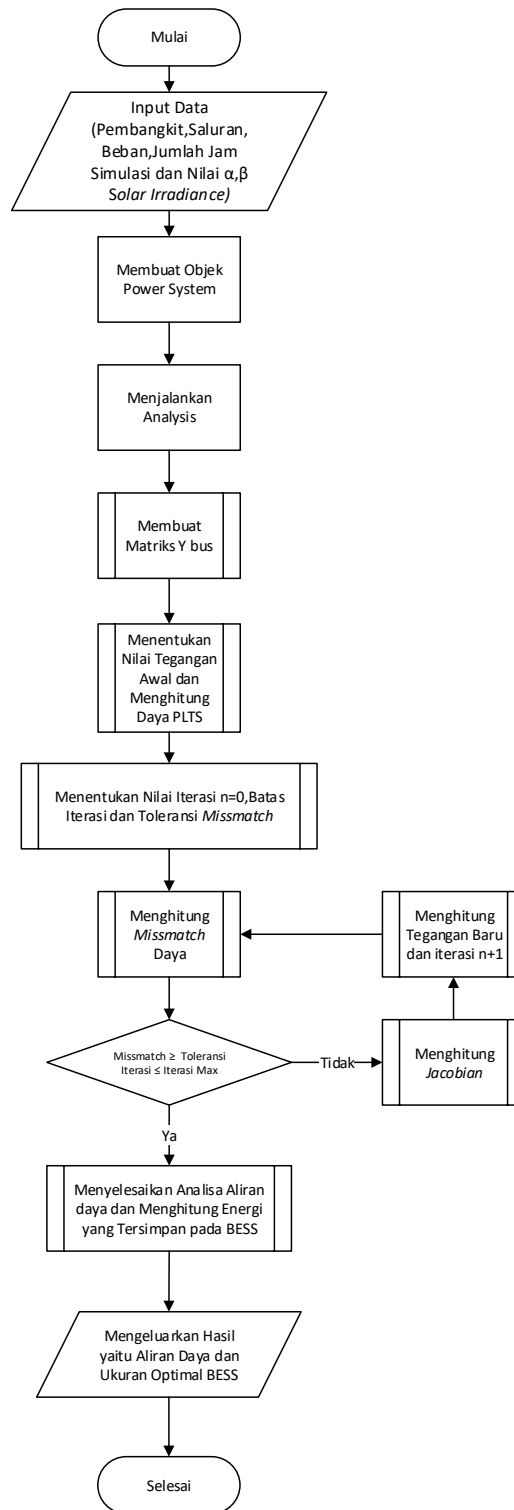
$$\bar{V}^{n+1} = \bar{V}^n + \Delta\bar{V} \quad (3.19)$$

Kemudian kembali ke langkah 6.

8. Menghitung nilai P dan Q pada setiap bus dan aliran daya pada saluran menggunakan tegangan yang sudah memenuhi toleransi *mismatch* . Energi yang tersimpan di dalam baterai pada jam ke-n menggunakan persamaan (3.4).

3.8 Diagram Alir Program

Berikut adalah diagram alir program yang akan dibuat pada penelitian ini :



Gambar 3.2 Diagram Alir Program

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun Kesimpulan dari tugas akhir ini adalah :

1. Program *Linear Programming Optimal Power Flow* dapat digunakan untuk penyelesaian *multi-period optimal power flow* dan dapat menghitung ukuran optimal kapasitas BESS pada suatu sistem *microgrid*.
2. Program *Linear Programming Multiperiod Optimal Power Flow* dapat menghitung kapasitas BESS suatu sistem *microgrid* dengan variasi pola penyinaran matahari yang berbeda-beda.
3. Energi yang tersimpan di dalam baterai, dipengaruhi oleh pola penyinaran matahari. Pola penyinaran yang memiliki nilai α lebih besar pada moda kedua, memiliki *solar irradiance* yang lebih besar sehingga menghasilkan daya keluaran PV lebih besar. Hal ini menyebabkan energi yang tersimpan semakin besar dan kapasitas baterai semakin besar.

5.2 Saran

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, penulis mengajukan saran sebagai berikut :

1. Untuk penelitian selanjutnya, program *Linear Programming Multiperiod Optimal Power Flow* dapat dikembangkan agar bisa menentukan posisi optimal dari BESS dan PV.
2. Pembangkit dengan sumber energi terbarukan yang lainnya dapat dimodelkan didalam program.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Turan Gonen, *Electric Power Distribution Engineering* 3rd Edition, New York: Taylor & Francis Group, 2014.

- [2] K. Mani Chandy *et al*, “*A Simple Optimal Power Flow Model with Energy Storage*”, 49th IEEE Conference on Decision and Control December 15-17, 2010 Hilton Atlanta Hotel, Atlanta, GA, USA.

- [3] Y. Levron dan J.M. Guerrero, “*Optimal Power Flow in Microgrids With Energy Storage*” , IEEE Transaction on Power System, 2013.

- [4] Zhongwei Wang,” *A Multi-Period Optimal Power Flow Model including Battery Energy Storage*”, IEEE Power & Energy Society General Meeting,2013

- [5] Tae Hyun Kim,” *A Multi-Period Optimal Power Flow algorithm for Microgrid in consideration with the State-of-Charge of BESS's*”, IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia - Pacific (ITEC) June 1 - 4,2016, Busan, Korea,2016.

- [6] R.H.Lasseter, “*MicroGrids*”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309) ,2002.
- [7] Ubaidah, “Load Frequency Control (LFC) Pada Mikrogrid Menggunakan Bulk Storage Battery”, Program Studi Teknik Elektro, Universitas Lampung, 2017.
- [8] Chandra Lima Silalahi, “Studi Optimasi Penentuan Lokasi Penempatan Distributed Generation pada Sistem Distribusi Tiga Fasa dengan Metode Binary Linier Programming (BLP), Program Studi Teknik Elektro, Universitas Lampung, 2016.
- [9] X.-F. Wang, Y. Song dan M. Irving, *Modern Power System Analysis*, New York: Springer Science-Business Media, LLC, 2008.
- [10] Ahmad Wira Satriawan, “Analisa Performasi Metode Vectorized Algorithm Berbasis Injeksi Daya dan Injeksi Arus” , Program Studi Teknik Elektro, Universitas Lampung, 2017.
- [11] Ziyad. M.Salameh, “*Photovoltaic Modul-Site Based on Capacity Factors*”, IEEE Transaction on Power System, Vol.10, No.2, June 1995.
- [12] Vaiju Kalkhambkar, “*Optimal Sizing of PV-Battery for Loss Reduction and Intermittency Mitigation*” IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014), May 09-11, 2014, Jaipur India.

- [13] YE Lin-hao, “*Research on Voltage of Distribution Networks with Distributed Photovoltaic System Based on Probabilistic Model*”, IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), 2015.
- [14] Y. M. Atwa, “Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 25, NO. 1, FEBRUARY 2010.
- [15] Chen Jian, Liu Yutian, “*Optimal Operating Strategy for Distribution Networks with PV and BESS Considering Flexible Energy Storage*”, IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM),2016.
- [16] Mohammed Kharrich and Mohamed Akherraz, “*Optimal Sizing and Cost of a Microgrid Based in PV, WIND and BESS for a School of Engineering*”, International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS),2017.
- [17] Lukmanul Hakim, Fandi Prayoga, Khairudin, Herri Gusmedi “*Vector Form Implementation in Three Phase Power Flow Analysis Based on Power Injection Rectangular Coordinate* “ Jurnal Nasional Teknik Elektro, Vol. 8, No. 1, Maret 2019.

[18] Syafii, Zaini, Dona Juliandri “ *Design of PV System for Electricity Peak-Shaving : A Case Study of Faculty of Engineering, Andalas University*”, 2018 *International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON) Galgotias University, Greater Noida, UP, India. Sep 28-29, 20*