



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**ANALISA ALIRAN DAYA MENGGUNAKAN METODE
NETWORK TOPOLOGY PADA SISTEM DISTRIBUSI
RADIAL DENGAN MEMPERTIMBANGKAN ADANYA
PENGARUH SUMBER PLTS & BEBAN**

Ahmad Bariq Al Fahri
NRP 07111640000162

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.

DEPATERMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



TUGAS AKHIR - EE 184801

**ANALISA ALIRAN DAYA MENGGUNAKAN METODE
NETWORK TOPOLOGY PADA SISTEM DISTRIBUSI
RADIAL DENGAN MEMPERTIMBANGKAN ADANYA
PENGARUH SUMBER PLTS & BEBAN**

Ahmad Bariq Al Fahri
NRP 07111640000162

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



FINAL PROJECT - EE 184801

***Power Flow Analysis Using Network Topology
Method in Radial Distribution Networks Considering
the Effect of Solar PV & Load***

Ahmad Bariq Al Fahri
NRP 07111640000162

Supervisor(s)
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics 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 “**Analisa Aliran Daya Menggunakan Metode Network Topology Pada Sistem Distribusi Radial Dengan Mempertimbangkan Adanya Pengaruh Sumber PLTS & 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

Ahmad Bariq Al Fahri
NRP. 0711 16 4000 0162

**ANA LISA ALIRAN DAYA MENGGUNAKAN
METODE NETWORK TOPOLOGY PADA SISTEM
DISTRIBUSI RADIAL DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN ADANYA PENGARUH
SUMBER PLTS & 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 dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I



Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
NIP. 19640405 199002 1001

SURABAYA
Juli, 2020

**ANALISA ALIRAN DAYA MENGGUNAKAN
METODE NETWORK TOPOLOGY PADA SISTEM
DISTRIBUSI RADIAL DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN ADANYA PENGARUH
SUMBER PLTS & BEBAN**

TUGAS AKHIR

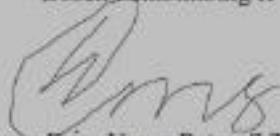
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

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

Menyetujui:

Dosen Pembimbing II



Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.

NIP. 19881108 201212 1001

**SURABAYA
Juli, 2020**

ANALISA ALIRAN DAYA MENGGUNAKAN METODE NETWORK TOPOLOGY PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL DENGAN MEMPERTIMBANGKAN ADANYA PENGARUH SUMBER PLTS & BEBAN

Nama : Ahmad Bariq Al Fahri
NRP : 07111640000162
Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
Pembimbing II : Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.

ABSTRAK

Daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) selain digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik masing-masing konsumen, juga mulai berkembang untuk dilakukan penjualan daya listrik ke konsumen lain. Proses ini memanfaatkan jaringan listrik dari *provider*, sehingga kelebihan daya akan dijual ke *provider* untuk selanjutnya dijual kembali ke konsumen lain yang membeli daya listrik. Apabila hal ini melebihi batas-batas yang ditentukan akan memberikan pengaruh pada tegangan sistem dan kualitas daya listriknya, seperti rugi-rugi daya dan faktor daya. Ada dan tidaknya regulasi atau manajemen dalam proses transaksi jual beli listrik juga akan berpengaruh pada parameter tersebut. Pada tugas akhir ini, akan dilakukan simulasi analisa aliran daya pada sistem distribusi radial dengan mempertimbangkan adanya pengaruh sumber PLTS dan beban. Metode aliran daya yang digunakan adalah metode *network topology*. Berdasarkan hasil analisis, kasus simulasi dengan penerapan regulasi menghasilkan tegangan tertinggi sebesar 1 p.u, tegangan terendah sebesar 0,9924289 p.u, dan persentase maksimum *loading* saluran sebesar 18,59%. Secara ekonomi, penerapan regulasi juga dapat menguntungkan tengkulak sebagai penyedia jasa kelistrikan.

Kata Kunci — *Analisa Aliran Daya, Jaringan Distribusi Radial, Metode Network Topology, PLTS & Beban*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

POWER FLOW ANALYSIS USING NETWORK TOPOLOGY METHOD IN RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS CONSIDERING THE EFFECT OF SOLAR PV & LOAD

Name : Ahmad Bariq Al Fahri
NRP : 07111640000162
Supervisor I : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
Supervisor II : Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.

ABSTRACT

Electricity generated by solar photovoltaic (SPV) besides being used to meet the electricity demands of each consumer, also began to develop of selling electricity to other consumers. This process utilizes the electricity network from the provider, so that excess power will be sold to the provider and then resold to other consumers who buy electricity. If this exceeds the specified limits, it will give effect to the voltage and the power quality of the system, such as power losses and power factors. The presence or absence of regulation or management in the process of buying and selling electricity will also affect these parameters. In this final project, a simulation of power flow analysis will be carried out on the radial distribution system by considering the influence of SPV sources and loads. The power flow method used is the network topology method. Based on the analysis results, the implementation of regulation shows the highest voltage is 1 p.u, the lowest voltage is 0,9924289 p.u, and the maximum percentage of cable loading is 18,59%. Economically, the implementation of regulations is profitable for energy retailer as providers of electricity services.

Keywords — *Power Flow Analysis, Radial Distribution Network, Network Topology Method, SPV & Load*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran ALLAH SWT atas segala rahmat, karunia, dan petunjuk-Nya, penelitian dan penulisan tugas akhir dengan judul “**Analisa Aliran Daya Menggunakan Metode Network Topology Pada Sistem Distribusi Radial Dengan Mempertimbangkan Adanya Pengaruh Sumber PLTS & Beban**” ini dapat diselesaikan dengan baik. Sholawat dan salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga dan sahabatnya.

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini penulis mengucapkan terima kasih atas segala do`a, bantuan, bimbingan, dan dukungan yang telah diberikan, kepada:

1. ALLAH SWT atas segala limpahan rahmat kepada penulis sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.
2. Orang tua, kakak, adik, serta semua keluarga penulis yang tak pernah lelah memberikan dukungan dari segi apapun kepada penulis dan tak henti-hentinya berdoa demi keberhasilan penulis.
3. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT. dan Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan perhatiannya selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
4. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, Ph.D., Dr. Ni Ketut Aryani, dan Dr. Eng. Rony Seto Wibowo serta Dr. Suyanto, ST., MT., atas segala pengalaman, motivasi, dan dukungan selama penulis menjadi asisten di PSSSL.
5. Seluruh dosen dan karyawan kampus ITS yang telah banyak berjasa selama empat tahun perkuliahan penulis.
6. Teman-teman Fake Friends yang membantu dan memberikan kesempatan untuk bertukar ilmu selama menjadi asisten di PSSSL serta adik-adik *trainee* 2017 dan calon *trainee* 2018.
7. Seluruh teman-teman selama penulis kuliah di ITS.

Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi mahasiswa maupun peneliti. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan, untuk itu kritik dan saran diharapkan untuk penyempurnaan tugas akhir ini.

Surabaya, 13 Juli 2020

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	xiii
ABSTRACT	xv
KATA PENGANTAR	xvii
DAFTAR ISI	xix
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metodologi Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
1.7 Relevansi.....	5
BAB II SISTEM DISTRIBUSI RADIAL, METODE <i>NETWORK TOPOLOGY</i>, DAN TRANSAKSI JUAL BELI LISTRIK	7
2.1 Sistem Distribusi Radial.....	7
2.2 Studi Aliran Daya.....	8
2.2.1 Definisi.....	8
2.2.2 Metode Network Topology	8
2.3 Distributed Generation	12
2.3.1 Photovoltaic.....	12
2.3.2 Photovoltaic Distributed Generation (PV-DG)	13
2.4 Transaksi Jual Beli Listrik	14
2.4.1 Skema Jual beli Listrik.....	15
2.4.2 Penjualan Energi Listrik.....	16
2.4.3 Pembelian Energi Listrik.....	17
2.5 Rugi Daya Listrik.....	17
2.6 Pembebanan Transformator dan Saluran	19
2.6.1 Pembebanan Transformator	19
2.6.2 Pembebanan Saluran	21
2.6.3 Klasifikasi Pembebanan	22
2.7 Faktor Daya.....	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27

3.1	Data Simulasi.....	29
3.1.1	Data Beban dan Saluran Distribusi	29
3.1.2	Data Transformator	34
3.1.3	Data Komposisi Beban	35
3.1.4	Data Daya Terbangkit PLTS.....	36
3.2	Pemodelan PV-DG sebagai <i>Negative PQ Load</i>	36
3.3	Batasan untuk Regulasi Transaksi	37
3.3.1	Batasan Teknis.....	37
3.3.2	Batasan Ekonomi	38
3.4	Penerapan Metode <i>Network Topology</i>	39
3.5	Skema dan Regulasi Transaksi Jual Beli Listrik	41
BAB IV	SIMULASI DAN ANALISIS	45
4.1	Validasi Simulasi dan Analisis pada Kondisi Awal.....	45
4.2	Simulasi dan Analisis pada Skenario 1	53
4.3	Simulasi dan Analisis pada Skenario 2	58
4.4	Simulasi dan Analisis pada Skenario 3	65
BAB V	PENUTUP	73
5.1	Kesimpulan.....	73
5.2	Saran	73
DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN	79
BIOGRAFI PENULIS	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Distribusi Radial	7
Gambar 2.2 Single Line Diagram Sistem Distribusi Radial.....	8
Gambar 2.3 Sistem PV yang terhubung dengan grid	13
Gambar 2.4 Model sistem distribusi sederhana untuk simulasi	14
Gambar 2.5 Skema Transaksi Jual Beli Listrik	16
Gambar 2.6 Pemodelan Saluran Sederhana	18
Gambar 2.7 Kurva Umur Transformator Terhadap Suhu Belitan.....	21
Gambar 2.8 Segitiga Daya	24
Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian Tugas Akhir	27
Gambar 3.2 <i>Single Line Diagram</i> Penyulang Badai	30
Gambar 3.3 <i>Software</i> Amadis.....	32
Gambar 3.4 <i>Software</i> Garmin MapSource	33
Gambar 3.5 PV-DG sebagai <i>negative PQ load</i>	37
Gambar 3.6 Diagram Alir Penerapan Metode <i>Network Topology</i>	40
Gambar 3.7 Skema Transaksi Jual Beli Listrik	42
Gambar 4.1 Tegangan Kondisi Normal dan Skenario 1	56
Gambar 4.2 Tegangan Kondisi Normal, Skenario 1, dan Skenario 2....	61
Gambar 4.3 Tegangan Kondisi Normal, Skenario 1, Skenario 2, dan Skenario 3.....	68

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Daftar Kuat Hantar Arus (KHA) Saluran	22
Tabel 3.1 Data Beban Penyulang Badai	31
Tabel 3.2 Data Saluran Distribusi Penyulang Badai	33
Tabel 3.3 Data Transformator	35
Tabel 3.4 Data Komposisi Beban	36
Tabel 3.5 Data Daya Terbangkit PLTS	36
Tabel 4.1 Tegangan Bus Penyulang Badai	46
Tabel 4.2 Arus Tiap Saluran Penyulang Badai	48
Tabel 4.3 Faktor Daya Tiap Bus Penyulang Badai	49
Tabel 4.4 Rugi Daya Aktif Penyulang Badai	50
Tabel 4.5 Rugi Daya Reaktif Penyulang Badai	52
Tabel 4.6 Tegangan dan Faktor Daya pada Skenario 1	54
Tabel 4.7 Arus Saluran, Rugi Daya Aktif dan Reaktif	56
Tabel 4.8 Tegangan dan Faktor Daya pada Skenario 2	59
Tabel 4.9 Aliran Daya Aktif dan Reaktif pada Skenario 2	61
Tabel 4.10 Arus Saluran, Rugi Daya Aktif dan Reaktif	63
Tabel 4.11 Tegangan dan Faktor Daya pada Skenario 3	66
Tabel 4.12 Aliran Daya Aktif dan Reaktif pada Skenario 3	68
Tabel 4.13 Arus Saluran, Rugi Daya Aktif dan Reaktif	70

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagai salah satu negara berkembang di Asia Pasifik, Indonesia memenuhi kebutuhan energi yang tinggi dengan bergantung pada bahan bakar fosil untuk membangkitkan listrik. Konsumsi bahan bakar fosil yang terus menerus menyebabkan krisis energi dan pencemaran lingkungan menjadi sangat parah dalam mempengaruhi kelangsungan hidup dan perkembangan manusia. Sebagai akibatnya, eksploitasi dan pemanfaatan energi yang berkelanjutan menjadi solusi dalam memenuhi konsumsi energi. Pesatnya perkembangan teknologi memicu pemanfaatan energi terbarukan. Hingga akhir tahun 2019 saja tercatat sebesar 98,92% *photovoltaic* tersambung ke jaringan kelistrikan (*grid*) dari total pemasangan *photovoltaic* di seluruh dunia [1].

Photovoltaic atau pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sebagai salah satu pemanfaatan energi terbarukan menjadi populer diaplikasikan pada sistem kelistrikan yang ada di perumahan atau untuk mengkompensasi konsumsi listrik jaringan. Skema kerjasama pemanfaatan PV saat ini mulai berkembang. Antar pelanggan bisa melakukan transaksi jual beli listrik, pelanggan dimana dengan mudah memasang *photovoltaic* akan memiliki kelebihan daya. Namun, pelanggan tidak memiliki jaringan kelistrikan untuk digunakan sebagai media penyaluran daya. Jaringan kelistrikan yang ada dimiliki oleh penyedia jasa kelistrikan atau *provider*. Saat ini, *provider* mulai melakukan ekspansi bisnisnya dengan melakukan pembelian listrik dari pelanggan [2]. Dalam skema ini, *provider* berperan sebagai tengkulak yang akan membeli kelebihan daya listrik atau *excess power* dari pelanggan untuk selanjutnya bisa dijual lagi kepada pelanggan lain yang melakukan pembelian daya listrik.

Adanya jual beli listrik pada jaringan kelistrikan ini akan berpengaruh pada beberapa parameter kualitas daya listrik. Jaringan distribusi bersifat radial untuk mengakomodasi aliran daya satu arah. Implementasi *distributed generation* (DG) dalam sistem menawarkan keunggulan berupa keandalan pasokan daya listrik, mengurangi rugi daya pada jaringan, dan memenuhi permintaan beban. PLTS merupakan salah satu jenis dari *distributed generation* (DG) [3]. DG merupakan pembangkit yang tersambung pada jaringan distribusi atau terhubung langsung dengan beban untuk perbaikan kualitas daya listrik. Adanya

skema jual beli listrik dengan memanfaatkan *excess power* dari PLTS memungkinkan terjadinya gangguan pada jaringan kelistrikan akibat penetrasi yang tinggi dan sifat intermitensi dari PLTS. Masuknya PLTS sebagai DG ke dalam jaringan kelistrikan akan memberikan beberapa dampak seperti naiknya tegangan sistem, turunnya rugi-rugi saluran, dan perbaikan faktor daya. Begitu pula ketika terjadi penambahan beban pada sistem akibat pembelian daya listrik akan menyebabkan terjadinya peningkatan pada rugi-rugi daya serta terjadinya jatuh tegangan [4]. Suplai daya aktif pada jaringan perumahan juga dapat memicu *overloading* pada saluran, meningkatnya arus gangguan, dan implikasi teknis lainnya yang menyebabkan kegagalan dan ketidakstabilan sistem kelistrikan [5].

Oleh karena itu, pada tugas akhir ini akan dilakukan analisa aliran daya untuk melihat kondisi jaringan kelistrikan pada tiap-tiap bus akibat adanya pengaruh sumber PLTS dan beban. Simulasi ini meliputi pengaruh perubahan beban, baik peningkatan dan pengurangan jumlahnya, perubahan lokasi sumber PLTS yang terhubung ke *grid* serta perubahan kapasitas daya yang tersambung. Parameter ini memberikan pengaruh yang signifikan pada profil tegangan sistem dan parameter kualitas daya listrik lainnya [6]. Digunakan metode *Network Topology* dalam menganalisa aliran daya pada sistem distribusi radial. Metode ini juga digunakan untuk mengetahui nilai tegangan pada tiap-tiap bus. Selain nilai tegangan tiap bus, juga akan dianalisis besarnya rugi-rugi daya listrik dan faktor daya. Serta akan disimulasikan pengaruh regulasi atau manajemen transaksi listrik terhadap tegangan sistem, rugi-rugi daya, dan faktor daya dari jaringan kelistrikan tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan diselesaikan dalam tugas akhir ini adalah tentang:

1. Bagaimana membuat program untuk simulasi aliran daya dengan adanya pengaruh sumber PLTS dan beban menggunakan metode Network Topology.
2. Bagaimana pengaruh adanya sumber PLTS dan beban terhadap tegangan sistem, rugi-rugi daya, dan faktor daya dari jaringan kelistrikan.
3. Bagaimana pengaruh regulasi atau manajemen transaksi listrik terhadap tegangan sistem, rugi-rugi daya, dan faktor daya dari jaringan kelistrikan.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk:

1. Mendapatkan program untuk simulasi aliran daya dengan adanya pengaruh sumber PLTS dan beban menggunakan metode Network Topology.
2. Mengetahui pengaruh adanya sumber PLTS dan beban terhadap tegangan sistem, rugi-rugi daya, dan faktor daya dari jaringan kelistrikan.
3. Mengetahui pengaruh regulasi atau manajemen transaksi listrik terhadap tegangan sistem, rugi-rugi daya, dan factor daya dari jaringan kelistrikan.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan sistem distribusi radial pada Penyulang Badai di Kota Bandar Lampung.
2. Sistem yang digunakan untuk analisis merupakan sistem dengan keadaan seimbang ($R=S=T$).
3. PV-DG atau PLTS dimodelkan sebagai negatif PQ *load*.
4. Data simulasi yang digunakan berdasarkan data yang diperoleh dari PLN UID Lampung.
5. Daya terbangkit dari PLTS menggunakan referensi [7].
6. Simulasi dilakukan menggunakan *software* Matlab R2016a dan ETAP 16.0.0.
7. Pada tugas akhir ini sistem diperbolehkan menjual *excess power* dan membeli daya listrik dalam selang waktu tertentu.

1.5 Metodologi Penelitian

Langkah-langkah yang dikerjakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur

Pada tahap awal dilakukan studi literatur pada referensi berupa jurnal, buku, atau *paper* untuk menguasai materi dalam Tugas Akhir ini. Materi yang dipelajari antara lain tentang analisa aliran daya menggunakan metode *network topology*, analisa aliran daya pada sistem distribusi radial, pengaruh PLTS ketika terhubung ke *grid*, pengaruh perubahan beban, dan regulasi untuk mengatur transaksi jual beli listrik, serta standar yang digunakan.

2. **Pengumpulan Data**

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data berupa data bus, data saluran, data trafo, serta data daya terbangkit dari PLTS yang akan digunakan untuk simulasi pada sistem distribusi radial. Data didapat dari PLN dan beberapa sumber lainnya. Data-data ini akan digunakan untuk simulasi pada software ETAP dan MATLAB.

3. **Pembuatan Program Matlab**

Pada tahap ini akan dilakukan pembuatan program M-File simulasi aliran daya dengan metode Network Topology pada Matlab. Kemudian untuk memvalidasi hasil simulasi pada Matlab juga akan dilakukan simulasi pada ETAP.

4. **Simulasi dan Analisis**

Pada tugas akhir ini simulasi dilakukan menggunakan Penyulang Badai pada sistem distribusi Kota Bandar Lampung. Disimulasikan beberapa skenario untuk mengetahui bagaimana pengaruhnya terhadap sistem distribusi. Data yang diperoleh akan dianalisis mengenai bagaimana pengaruh PLTS dan beban terhadap kondisi tegangan sistem, rugi-rugi daya, dan faktor daya.

5. **Penyusunan Laporan Tugas Akhir**

Pada tahapan terakhir, penulis menyusun laporan tugas akhir berdasarkan progres yang telah dilaksanakan dan hasil perhitungan serta simulasi yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Buku tugas akhir ini membahas mengenai sistem yang terbagi menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut:

Bab I : PENDAHULUAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, metodologi penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi dari tugas akhir.

Bab II : TINJAUAN PUSTAKA

Bab II menjelaskan mengenai tentang teori pendukung yang berkaitan dengan topik Tugas Akhir. Teori pendukung ini meliputi analisa aliran daya menggunakan metode *network topology*, analisa aliran daya pada sistem distribusi radial, pengaruh PLTS ketika terhubung ke *grid*, pengaruh perubahan beban, dan regulasi untuk mengatur transaksi jual beli listrik, serta standar yang digunakan.

Bab III : METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan membahas tentang langkah-langkah penelitian serta metode yang digunakan pada penelitian. Juga akan dijelaskan penggunaan metode Network Topology dalam analisa aliran daya.

Bab IV : SIMULASI DAN ANALISIS

Bab IV menjelaskan tentang hasil simulasi dan analisis data. Simulasi dan analisis dilakukan pada setiap skenario terkait pengaruh sumber PLTS dan beban.

Bab V : PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan yang diperoleh dari penelitian tugas akhir ini serta saran untuk membantu dalam pengembangan lebih lanjut.

1.7 Relevansi

Dengan adanya penelitian pada Tugas Akhir ini, diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Memberikan referensi terhadap permasalahan saat ini terkait perkembangan dan pemanfaatan energi baru terbarukan dan pengaruhnya pada jaringan kelistrikan.
2. Menjadi referensi dalam analisa aliran daya menggunakan metode *Network Topology*.
3. Menjadi referensi dalam manajemen aliran daya listrik.
4. Sebagai referensi bagi mahasiswa dalam penelitian di bidang aliran daya sistem tenaga listrik dengan pengaruh adanya sumber PLTS yang terhubung ke sistem dan perubahan beban.
5. Menambah pemahaman ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK) di bidang sistem tenaga listrik.

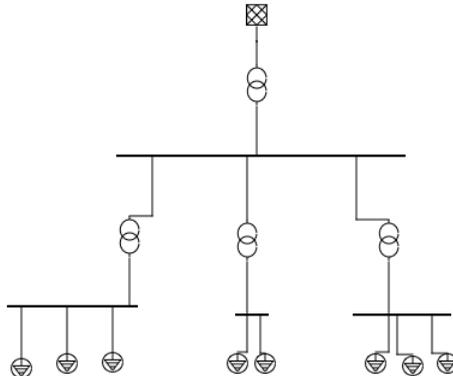
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

SISTEM DISTRIBUSI RADIAL, METODE *NETWORK TOPOLOGY*, DAN TRANSAKSI JUAL BELI LISTRIK

2.1 Sistem Distribusi Radial

Sistem distribusi adalah salah satu bagian dalam sistem kelistrikan atau pengiriman daya listrik. Sistem ini biasanya dimulai dari gardu distribusi yang disuplai langsung oleh satu atau lebih saluran subtransmisi. Pada beberapa gardu distribusi lainnya, ada yang langsung mendapatkan suplai dari saluran transmisi tegangan tinggi. Pada sistem distribusi terdapat banyak perbedaan dibandingkan sistem transmisi. Sistem distribusi akan berhubungan langsung dengan jaringan pelanggan [8]. Berdasarkan jenisnya, terdapat sistem distribusi jenis loop dan radial. Sistem distribusi radial merupakan salah satu sistem distribusi yang bermula dari satu titik yang bercabang-cabang ke beban. Umumnya sistem distribusi radial terdapat cabang yang jumlahnya sangat banyak. Gambar dibawah ini merupakan salah satu contoh sistem distribusi radial.



Gambar 2.1 Sistem Distribusi Radial

Beberapa kelemahan dari sistem distribusi radial adalah keandalan jaringannya yang lebih buruk dibandingkan dengan sistem distribusi *loop*. Kualitas dayanya juga relatif jelek, karena rugi daya listrik pada saluran dan rugi tegangan yang besar. Keandalan sistem juga buruk akibat hanya ada satu alternatif saluran antara sumber dan titik beban. Sehingga kualitas dayanya kurang terjamin.

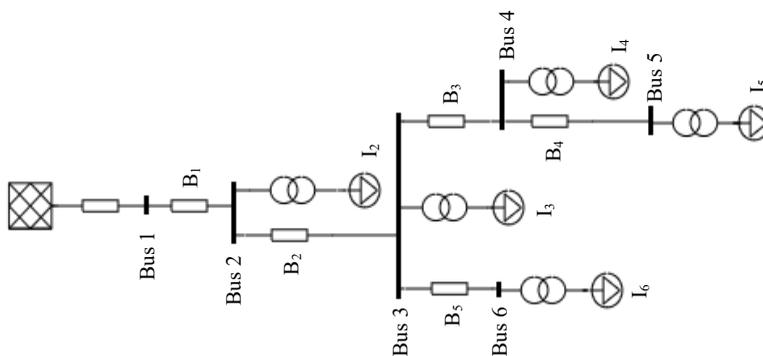
2.2 Studi Aliran Daya

2.2.1 Definisi

Analisa aliran daya merupakan suatu analisa untuk mengetahui kemana saja daya mengalir pada suatu sistem atau jaringan kelistrikan. Hasil yang didapatkan dari analisa aliran daya dapat berupa tegangan, arus listrik, serta daya itu sendiri yang terbagi menjadi daya aktif dan daya reaktif. Analisa ini merupakan langkah awal sebelum melakukan analisa lanjutan seperti analisa tegangan, rugi-rugi, maupun faktor daya [9]. Metode yang digunakan dalam analisa aliran daya bermacam-macam jenisnya, beberapa diantaranya adalah metode Newton-Raphson, Fast Decoupled, Gauss-Seidel, dan Modified Gauss-Seidel. Masing-masing metode memiliki kelebihan dan kekurangan ketika digunakan dalam analisa aliran daya. Metode tersebut lebih cocok digunakan pada sistem transmisi [8]. Apabila digunakan pada sistem distribusi radial, metode tersebut memberikan nilai konvergensi yang buruk.

2.2.2 Metode Network Topology

Metode *Network Topology* atau topologi jaringan akan digunakan dalam analisa aliran daya pada tugas akhir ini. Metode ini lebih cocok digunakan pada sistem distribusi radial. Tahapan dari metode ini adalah diawali dengan memodelkan single line diagram yang akan dianalisa menjadi sebuah matriks atau persamaan matematis. Terdapat dua matriks yang digunakan dalam perhitungan analisa aliran daya, yakni matriks *Bus-Injection to Branch-Current* (BIBC) dan matriks *Branch-Current to Bus-Voltage* (BCBV) [10] [11].



Gambar 2.2 Single Line Diagram Sistem Distribusi Radial

Pada matriks BIBC, besarnya arus yang mengalir pada saluran dapat dihitung terlebih dahulu melalui persamaan berikut:

$$I_i^n = \text{conj} \frac{P_i + jQ_i}{V_i^n} \quad (2.1)$$

Dimana:

- I_i^n : Arus pada bus-i saat iterasi ke-n
- V_i^n : Tegangan pada bus-i saat iterasi ke-n
- P_i : Daya aktif pada bus i
- Q_i : Daya reaktif pada bus i

Kemudian tahapan selanjutnya adalah membuat persamaan yang menghubungkan antara arus dengan saluran pada sistem distribusi. Berdasarkan Hukum Kirchoff tentang arus, didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$B_5 = I_6 \quad (2.2.1)$$

$$B_4 = I_5 \quad (2.2.2)$$

$$B_3 = I_4 + I_5 \quad (2.2.3)$$

$$B_2 = I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad (2.2.4)$$

$$B_1 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad (2.2.5)$$

Pada persamaan 2.2.1 sampai persamaan 2.2.5 saluran dimodelkan menggunakan variable $B_1 - B_5$. Persamaan diatas apabila dinyatakan dalam bentuk matriks adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Angka 0 menunjukkan tidak adanya hubungan antara arus dengan saluran, sedangkan angka 1 menunjukkan ada hubungan antara keduanya. Matriks diatas dapat disederhanakan menjadi persamaan berikut:

$$[B] = [BIBC][I] \quad (2.4)$$

Setelah matriks BIBC terbentuk, tahapan berikutnya adalah membuat matriks BCBV. Matriks ini merupakan hubungan antara arus saluran dengan tegangan yang ditentukan berdasarkan Hukum Kirchoff untuk tegangan. Matriks ini nantinya akan digunakan untuk menentukan nilai drop tegangan masing-masing bus.

$$V_2 = V_1 - B_1.Z_{12} \quad (2.5.1)$$

$$V_3 = V_2 - B_2.Z_{23} \quad (2.5.2)$$

$$V_4 = V_3 - B_3.Z_{34} \quad (2.5.3)$$

$$V_5 = V_4 - B_4.Z_{45} \quad (2.5.4)$$

$$V_6 = V_3 - B_5.Z_{26} \quad (2.5.5)$$

Substitusi masing-masing persamaan ke persamaan berikutnya sehingga persamaannya menjadi seperti berikut:

$$V_2 = V_1 - B_1.Z_{12} \quad (2.6.1)$$

$$V_3 = V_1 - B_1.Z_{12} - B_2.Z_{23} \quad (2.6.2)$$

$$V_4 = V_1 - B_1.Z_{12} - B_2.Z_{23} - B_3.Z_{34} \quad (2.6.3)$$

$$V_5 = V_1 - B_1.Z_{12} - B_2.Z_{23} - B_3.Z_{34} - B_4.Z_{45} \quad (2.6.4)$$

$$V_6 = V_1 - B_1.Z_{12} - B_2.Z_{23} - B_3.Z_{34} - B_4.Z_{45} - B_5.Z_{26} \quad (2.6.5)$$

Nilai V_1 dipindahkan ke ruas kiri sehingga didapat persamaan untuk nilai drop tegangan seperti berikut:

$$V_1 - V_2 = B_1.Z_{12} \quad (2.7.1)$$

$$V_1 - V_3 = B_1.Z_{12} - B_2.Z_{23} \quad (2.7.2)$$

$$V_1 - V_4 = B_1.Z_{12} - B_2.Z_{23} - B_3.Z_{34} \quad (2.7.3)$$

$$V_1 - V_5 = B_1.Z_{12} - B_2.Z_{23} - B_3.Z_{34} - B_4.Z_{45} \quad (2.7.4)$$

$$V_1 - V_6 = B_1.Z_{12} - B_2.Z_{23} - B_3.Z_{34} - B_4.Z_{45} - B_5.Z_{26} \quad (2.7.5)$$

Selanjutnya matriks BCBV dapat disusun dari fungsi persamaan diatas.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \\ B5 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Matriks tersebut apabila ditulis menjadi persamaan yang sederhana menjadi:

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \quad (2.9)$$

Substitusi nilai matrik B dengan nilai matrik pada persamaan 2.4 sehingga persamaan matrik menjadi:

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \quad (2.10)$$

Hasil perkalian antara matriks BCBV dengan matriks BIBC dapat ditulis sebagai matrik DLF atau *Distribution Load Flow Matrix*.

$$[\Delta V] = [DLF][I] \quad (2.11)$$

Dari persamaan matriks DLF dapat diuraikan menjadi:

$$[DLF] = [BCBV][BIBC] \quad (2.12)$$

$$[\Delta V^{n+1}] = [DLF][I^n] \quad (2.13)$$

$$[V^{n+1}] = [V_1] - [\Delta V^{n+1}] \quad (2.14)$$

Dimana:

ΔV^{n+1} : Drop tegangan pada iterasi ke-n+1

I^n : Arus saluran pada iterasi ke-n+1

V_1 merupakan tegangan pada bus Gardu Induk atau *swing bus*, sehingga persamaan 2.14 akan diperbarui nilainya pada setiap iterasi. Nilai diperbarui dari hasil pada persamaan 2.13 dan akan diperoleh tegangan yang sesuai pada saat iterasi sudah konvergen.

Nilai tegangan tiap bus selanjutnya dihitung dengan mempertimbangkan nilai impedansi trafo.

$$I_{TR} = \frac{V_i}{S_{TR}} \quad (2.15)$$

$$Z_{TR} = \frac{Z_{TR(\%)}}{Z_{TR(base)}} \quad (2.16)$$

$$V_i = V_i - I_{TR} \cdot Z_{TR} \quad (2.17)$$

Dimana:

I_{TR} : Arus pada sisi primer transformator

V_i : Tegangan bus sebelum perhitungan dengan impedansi trafo

S_{TR} : Kapasitas transformator

V_i : Tegangan bus setelah perhitungan dengan impedansi trafo

Z_{TR} : Impedansi trafo

Dari persamaan ini selanjutnya akan dilakukan perhitungan hingga beberapa iterasi sampai didapatkan nilai seperti tegangan, arus, dan rugi-rugi daya listrik pada sistem.

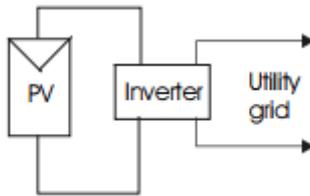
2.3 Distributed Generation

2.3.1 Photovoltaic

Photovoltaic atau yang lebih dikenal sebagai sel surya merupakan alat yang berfungsi mengonversi energi dari sinar matahari menjadi energi listrik. Ketika foton yang terdapat dalam energi matahari mengenai permukaan dari sel surya, akan menyebabkan elektron tereksitasi sehingga terbentuklah energi listrik. Hal ini disebabkan karena lapisan dari sel surya mengandung unsur silikon, yakni lapisan negatif (tipe-n) dan lapisan positif (tipe-p) [12].

PV juga dimungkinkan untuk tersambung atau interkoneksi

dengan jaringan utilitas (grid). Sistem seperti ini mampu mengirim kelebihan daya ke grid atau memanfaatkan sistem dari grid sebagai backup ketika daya yang terbangkit dari PV tidak mencukupi. Pada model seperti ini, PV pada sistem selain dapat mengirim daya pada jaringan kelistrikan atau grid juga dapat menerima suplai daya dari grid ketika tidak ada daya terbangkit dari PV [13]. Hal yang perlu diperhatikan dari sistem PV adalah penyimpanan energi atau *energy storage*, karena daya PV bergantung dari radiasi sinar matahari maka penyimpanan energi ini penting agar saat PV tidak tersinari matahari, daya yang dihasilkan masih dapat digunakan. Hal ini juga memerlukan *charge controller* agar daya masukan dan keluaran PV dapat diatur, sehingga tidak terjadi charging ataupun discharging yang berlebihan. Berikut adalah salah satu contoh sistem PV yang tersambung dengan grid:

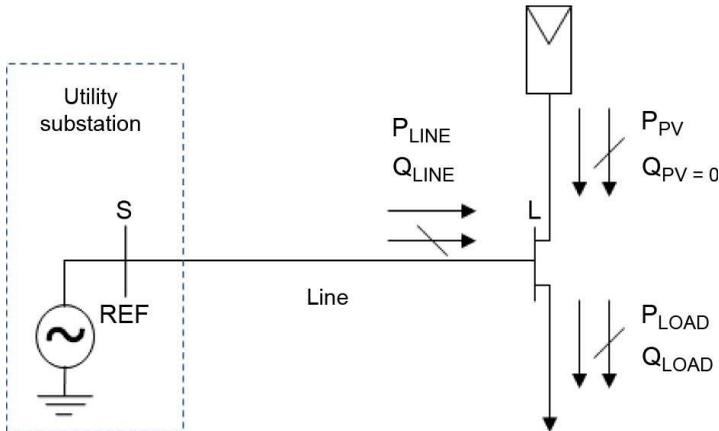


Gambar 2.3 Sistem PV yang terhubung dengan grid

2.3.2 Photovoltaic Distributed Generation (PV-DG)

Photovoltaic atau lebih dikenal sebagai PLTS merupakan salah satu jenis dari *distributed generation*. Umumnya pembangkit berada di lokasi yang dekat dengan sumber-sumber pembangkitan. Kemudian daya listrik dari pembangkit disalurkan melalui saluran transmisi dan berakhir di jaringan distribusi. Berbeda dengan pembangkit pada umumnya, PV-DG merupakan suatu pembangkit yang lokasinya terletak pada jaringan distribusi [3]. Masuknya sumber pembangkitan daya pada level distribusi memberikan manfaat salah satunya adalah menurunkan rugi daya jaringan dan meningkatkan profil tegangan [6]. Semakin murah harga photovoltaic, mendorong banyak orang untuk melakukan pemasangan photovoltaic. Berdasarkan suplai dayanya sel surya atau PV tergolong dalam DG tipe 1, dimana DG tipe ini hanya mampu memberikan suplai daya aktif pada sistem [14]. Namun, seiring dengan kemajuan teknologi sistem PV tidak hanya memberikan suplai daya aktif saja, akibat

terintegrasi dengan inverter dan komponen lainnya, PV juga memberikan suplai daya reaktif.



Gambar 2.4 Model sistem distribusi sederhana untuk simulasi

Pemasangan PLTS pada banyak atap rumah menimbulkan kekhawatiran tambahan, hal ini meningkatkan jumlah DG yang terhubung ke jaringan. Perlunya pengawasan yang lebih banyak dan kontrol dari operator menjadi hal wajib, dimana hal ini merupakan hambatan teknis akibat penyebaran PLTS di rumah-rumah dalam skala yang besar. Efek pada tegangan sistem tentu menjadi salah satu hal yang harus dipelajari secara mendalam, utamanya metode untuk mengevaluasi tingkat penetrasi PLTS yang maksimal atau optimum pada jaringan [15].

2.4 Transaksi Jual Beli Listrik

Semakin pesatnya pemanfaatan energi terbarukan mendorong masyarakat untuk melakukan pemasangan pembangkit energi terbarukan di skala rumah tangga hingga komersial, bahkan hingga skala industri. Saat ini, pelanggan yang memiliki daya listrik terbangkit dari PLTS mulai melakukan penjualan daya listrik tersebut pada penyedia jasa kelistrikan dengan harga yang telah ditentukan [16]. Berikut adalah beberapa skema dalam transaksi jual beli listrik [17]:

1. *Feed-in-Tariff*

Feed-in-Tariff merupakan mekanisme atau skema

kebijakan ekonomi untuk meningkatkan investasi di bidang teknologi energi terbarukan. Mekanisme ini akan membayar *excess power* yang terbangkit dari PLTS terpasang. Pada skema ini kelebihan daya akan dibeli oleh *energy retailer* atau tengkulak energi. Salah satu hal yang menarik dari FiT adalah imbalan finansial ini, dimana pelanggan akan dibayar menggunakan uang untuk semua energi listrik yang dijual.

Di bawah skema FiT, pelanggan akan ditawarkan kontrak jangka panjang terkait penjualan daya listrik oleh *energy retailer*.

2. *Net Metering*

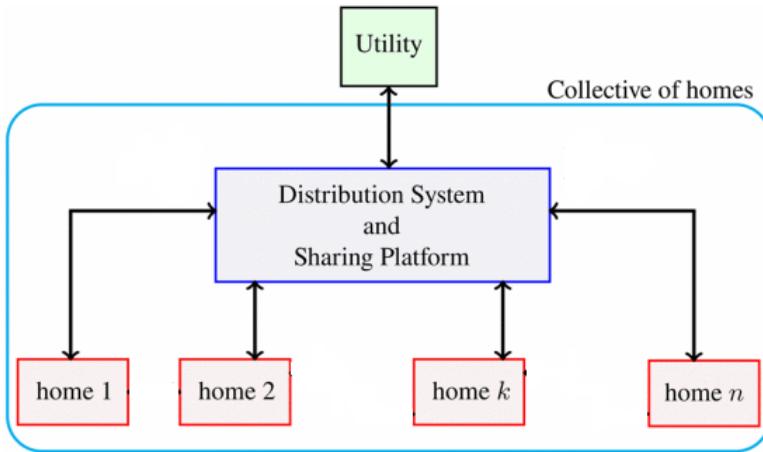
Net Metering memiliki skema yang hampir sama dengan FiT, bedanya adalah *net-metering* menggunakan sistem kredit, dimana nilai kWh produksi akan digunakan untuk mengkompensasi nilai kWh konsumsi.

Pelanggan yang menggunakan skema *net metering* biasanya akan dilengkapi dengan *bidirectional meter* atau kWh meter dua arah. Apabila terjadi surplus antara ekspor dan impor energi, maka akan dikonversi sebagai kredit untuk mengurangi tagihan pada bulan berikutnya.

2.4.1 Skema Jual beli Listrik

Di Indonesia, *marketplace* untuk transaksi jual beli listrik diatur oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN) serta Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Skema jual beli listrik yang ada adalah menggunakan skema *Net Metering* dengan kWh ekspor-impor. Skema ini diatur berdasarkan [18]. Seperti misalnya untuk kapasitas PLTS tersambung maksimal sebesar 100% dari daya tersambung konsumen PLN. Kemudian energi listrik yang dijual dihargai 65% dari tarif dasar listriknya.

Pada tugas akhir ini, diusulkan skema transaksi jual beli listrik baru yang sama seperti transaksi jual beli barang pada *marketplace*. Terdapat beberapa pelaku transaksi yakni penjual, pembeli, tengkulak, serta barang yang diperjualbelikan. Dalam hal ini barang yang diperjualbelikan adalah energi listrik [16].



Gambar 2.5 Skema Transaksi Jual Beli Listrik

Konsep dari transaksi jual beli listrik ini adalah pelanggan dapat melakukan pembelian ataupun penjualan energi listrik. Pembelian dalam hal ini adalah penambahan daya listrik dalam jangka waktu tertentu. Sedangkan penjualan adalah melakukan transfer daya listrik yang terbangkit dari PLTS yang terpasang pada tempat tinggal atau lokasi masing-masing dan terhubung dengan jaringan kelistrikan. Dalam transaksi ini, terdapat tengkulak yang memfasilitasi transaksi jual beli listrik. Tengkulak disini merupakan *provider* atau penyedia jasa kelistrikan. Tengkulak juga dapat menyuplai daya listrik pada pelanggan. Transaksi hanya dapat terjadi atau *deal* apabila sistem dalam keadaan aman untuk parameter kualitas daya listriknya saat terjadi transfer daya dari pelanggan ataupun terjadi peningkatan permintaan suplai daya listrik.

Pelanggan atau konsumen juga diasumsikan memiliki kebutuhan listrik yang tidak dapat disuplai sepenuhnya oleh sistem PLTS. Sehingga, pelanggan juga terhubung dengan jaringan kelistrikan *provider* untuk memenuhi kebutuhan listriknya.

2.4.2 Penjualan Energi Listrik

Pada tugas akhir ini, konsumen bertindak sebagai *prosumer*, dimana konsumen dapat melakukan penjualan energi listrik dan juga mengonsumsi energi listrik sesuai langganan daya listrik masing-masing [17]. Terdapat beberapa tipe dari *prosumer* [19]:

1. *Prosumer* pada skala rumah tangga yang memproduksi listrik di rumahnya dengan menggunakan PLTS terpasang pada atap rumah.
2. *Prosumer* pada skala komersial yang memproduksi listrik pada institusi public seperti kampus, rumah sakit, perkantoran, pusat perbelanjaan, dan sebagainya.

Penjualan energi listrik dapat dilakukan apabila tidak melanggar batasan seperti tegangan, pembebanan trafo dan saluran, faktor daya, serta rugi daya listriknya. Standar yang digunakan adalah standar oleh PLN atau dikenal dengan SPLN.

2.4.3 Pembelian Energi Listrik

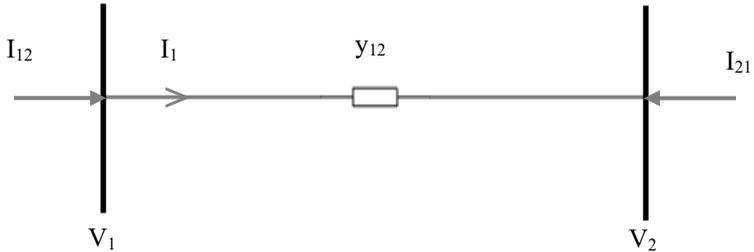
Pada penelitian tugas akhir ini, pembelian energi listrik diasumsikan sebagai penambahan daya listrik pada pelanggan dalam jangka waktu tertentu. Apabila mengacu pada program PLN yakni sambungan sementara, pelanggan dapat mengajukan permohonan untuk mendapatkan suplai daya listrik yang lebih besar dari kapasitas langganannya. Misalnya untuk kebutuhan hajatan, pesta atau kegiatan sejenisnya. Namun, penyambungan ini bersifat temporal atau tidak berkelanjutan. Kapasitas penambahan daya listrik yang disediakan juga sangat besar hingga mencapai 197 kVA. Sehingga apabila tidak dilakukan pembatasan maka dapat menyebabkan terjadinya gangguan pada sistem.

2.5 Rugi Daya Listrik

Rugi daya listrik merupakan berkurangnya nilai suplai daya listrik yang dikirimkan oleh sumber atau dalam hal ini penyedia jasa kelistrikan kepada pelanggan. Daya listrik yang hilang akibat adanya rugi daya adalah daya yang dibangkitkan namun tidak terjual. Apabila suatu saluran mengalirkan arus secara kontinu maka akan timbul disipasi panas pada saluran tersebut. Rugi daya listrik disebabkan oleh panjang saluran atau lokasi antara beban dengan sumber. Hal ini terjadi karena impedansi saluran dipengaruhi oleh parameter tersebut. Semakin jauh lokasi beban yang akan dialiri listrik atau semakin panjang salurannya, maka rugi daya listrik juga semakin besar.

Penentuan nilai rugi daya listrik dapat dilakukan dengan mengetahui nilai tegangan dan arus pada tiap bus terlebih dahulu. Saluran pada sistem tenaga listrik dapat dimodelkan seperti pada Gambar 2.6 dimana impedansi saluran diubah menjadi admitansi per unit pada nilai

MVA base [9].



Gambar 2.6 Pemodelan Saluran Sederhana

Daya aktif dan daya reaktif pada bus 1 adalah:

$$P_1 + jQ_1 = V_1 I_1^* \quad (2.18)$$

Atau dapat dituliskan,

$$I_1 = \frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*} \quad (2.19)$$

Pada Gambar 2.6, arus I_{12} diukur pada bus 1 dan diasumsikan bernilai positif untuk arah dari bus 1 ke bus 2. Sehingga, persamaan dapat ditulis:

$$I_{12} = I_1 = y_{12} \cdot (V_1 - V_2) \quad (2.20)$$

Dimana,

- I_1 = Arus pada saluran antara bus 1 dan bus 2
- y_{12} = Admitansi saluran antara bus 1 dan bus 2
- V_1 = Tegangan bus 1
- V_2 = Tegangan bus 2

Hal yang sama pada arus saluran I_{21} diukur pada bus 2 dan diasumsikan bernilai positif untuk arah dari bus 2 ke bus 1. Sehingga, persamaan dapat ditulis:

$$I_{21} = -I_{12} = y_{21} \cdot (V_2 - V_1) \quad (2.21)$$

Daya kompleks S_{12} dari bus 1 ke bus 2 dan S_{21} dari bus 2 ke bus 1 dapat dinyatakan pada persamaan berikut:

$$S_{12} = V_1 I_{12}^* \quad (2.22)$$

$$S_{21} = V_2 I_{21}^* \quad (2.23)$$

Rugi daya pada saluran antara bus 1 dan bus 2 merupakan penjumlahan matematis dari daya kompleks pada persamaan 2.22 dan 2.23, sehingga persamaannya menjadi:

$$S_{L12} = S_{12} + S_{21} \quad (2.24)$$

Didapatkan persamaan untuk menghitung total rugi daya saluran untuk sistem dengan jumlah n bus adalah:

$$S_{LT} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{Lij} \quad (2.25)$$

Dimana,

S_{Lij} = Rugi daya pada saluran antara bus i dan bus j

S_{LT} = Total rugi daya

2.6 Pembebanan Transformator dan Saluran

Transformator atau trafo dan saluran merupakan komponen penting yang ada dalam sistem tenaga listrik. Gangguan yang terjadi pada keduanya dapat menyebabkan suplai daya listrik pada pelanggan menjadi terganggu. Melihat pentingnya kedua komponen ini, maka diharapkan keduanya mampu bekerja secara maksimal dan handal pada sistem kelistrikan.

Pembebanan atau *loading* pada transformator dan saluran penghantar menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi umur dari peralatan tersebut. Apabila keduanya mengalami gangguan akibat *overload* tentu akan berakibat pada kontinuitas penyaluran daya listrik ke pelanggan. Sehingga pembebanan dari transformator dan saluran penghantar perlu diperhatikan untuk menjaga umur dari peralatan serta kualitas dan keandalan dalam penyaluran daya listrik.

2.6.1 Pembebanan Transformator

Pada sistem distribusi, transformator distribusi digunakan untuk

mengubah level tegangan dari jaringan tegangan menengah (20 kV) menjadi level jaringan tegangan rendah (380V/220V). Level jaringan tegangan rendah ini yang akan terhubung dengan beban (pelanggan).

Mengacu pada referensi [20] terdapat beberapa kondisi pembebanan pada transformator di sistem distribusi PLN, yaitu:

1. *Underload*, adalah kondisi saat pembebanan dari transformator bernilai kurang dari 40% dari kapasitasnya.
2. *Normal load*, adalah kondisi saat pembebanan dari transformator bernilai antara 40% hingga 80% dari kapasitasnya.
3. *Overload*, adalah kondisi saat pembebanan dari transformator bernilai lebih dari 80% dari kapasitasnya.

Rasio pembebanan pada transformator dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$K = \frac{S}{S_{TR}} \quad (2.26)$$

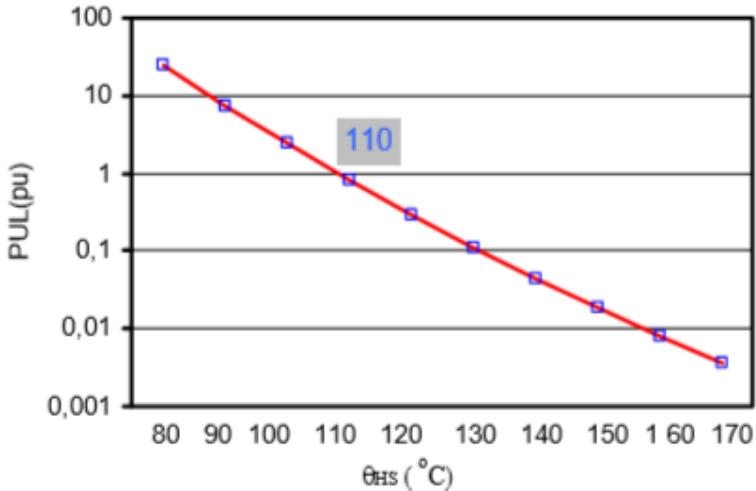
Dimana:

K = Rasio Pembebanan Transformator

S = Beban Transformator (MVA)

S_{TR} = Kapasitas Transformator (MVA)

Kondisi pembebanan pada transformator ini akan berpengaruh pada suhu konduktor belitannya. Suhu yang melebihi batas akan memperpendek umur dari transformator, begitu juga sebaliknya. Pembebanan yang berlebih pada transformator akan menyebabkan panas berlebih pada transformator sehingga meningkatkan proses oksidasi minyak trafo. Pengikisan unsur logam akan terjadi akibat dipicu oleh hasil oksidasi ini dan akan berujung pada penurunan isolasi yang mengakibatkan kerusakan transformator [21].



Gambar 2.7 Kurva Umur Transformator Terhadap Suhu Belitan

Hubungan antara umur atau *lifetime* dari transformator dengan suhu belitan dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$PUL = A \cdot EXP\left[\frac{B}{\theta_{HS}+273}\right] \quad (2.27)$$

Dimana:

PUL = *per unit life* (p.u)

θ_{HS} = *hottest-spot temperature* (°C)

A, B = konstanta (A=9.8x10⁻¹⁸; B=15000)

2.6.2 Pembebanan Saluran

Sama halnya seperti pembebanan transformator, saluran pada sistem tenaga listrik juga mengalami pembebanan. Pembebanan ini berkaitan dengan *ampacity* dari saluran. *Ampacity* merupakan kemampuan suatu saluran untuk menghantarkan arus. Setiap saluran memiliki nilai *ampacity* yang berbeda-beda. Berdasarkan ukurannya, semakin besar saluran maka semakin besar pula kemampuan saluran tersebut untuk menghantar arus ke beban.

Selain ukuran saluran, pembebanan saluran juga berpengaruh terhadap *total ampacity* dari saluran. Sebuah saluran dengan faktor

pembebanan 75% akan memiliki kapasitas yang diizinkan untuk menghantar arus lebih tinggi dibanding saluran dengan faktor pembebanan 100% [22]. Pembebanan juga akan berpengaruh pada suhu saluran. Pembebanan yang tinggi menyebabkan arus pada saluran juga tinggi, hal ini akan menyebabkan terjadinya peningkatan suhu pada saluran.

Pada sistem distribusi PLN, *ampacity* atau disebut juga sebagai Kuat Hantar Arus (KHA) diatur dalam SPLN 64: 1985 tentang Petunjuk Pemilihan dan Penggunaan Pelebur pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah [23]. Besar KHA dari saluran ini dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.1 Daftar Kuat Hantar Arus (KHA) Saluran

Luas Penampang (mm ²)	KHA terus menerus, untuk penghantar AAC (A)	KHA terus menerus, untuk penghantar AAAC (A)
16	110	105
25	145	135
35	180	170
50	225	210
70	270	255
95	340	320
120	390	365
150	455	425
185	520	490
240	625	585

Daftar KHA di atas dihitung berdasarkan kondisi berikut [23]:

- Kecepatan angin 0,6 m/s
- Suhu keliling akibat sinar matahari 35°C
- Suhu penghantar maksimum 80 °C
- Bila tidak ada angin maka KHA dapat dikali dengan 0,7

2.6.3 Klasifikasi Pembebanan

Pembebanan dari transformator dan saluran dipengaruhi oleh jenis beban itu sendiri. Berdasarkan jenis pelanggan, beban dapat diklasifikasikan dalam tiga jenis. Berikut adalah ketiga jenis beban tersebut:

1. Beban Rumah Tangga

Beban rumah tangga umumnya didominasi oleh tempat tinggal atau rumah penduduk. Peralatan yang ada pada beban rumah tangga biasanya terdiri dari peralatan listrik seperti pendingin ruangan (AC), kulkas, lampu, kipas angin, televisi, dan sebagainya.

Transformator distribusi melayani beban rumah tangga dengan pembebanan yang fluktuatif, nilainya bergantung pada interval waktu tertentu. Hal tersebut diakibatkan pola konsumsi listrik konsumen yang berbeda-beda atau bervariasi. Salah satu faktor lain yang menentukan konsumsi daya listrik adalah jumlah anggota rumah tangga. Kondisi ini menjadi sebab kurva harian beban pada transformator distribusi menunjukkan nilai yang berubah-ubah. Pada jam tertentu nilainya akan kecil dan bisa juga lebih besar dari kapasitas transformator. Beban rumah tangga umumnya memiliki dua puncak pada kurva harian bebannya, pada siang hari dan malam hari.

2. Beban Bisnis (Komersial)

Beban bisnis atau komersial merupakan salah satu jenis beban yang terdiri dari suatu pertokoan, rumah makan atau tempat perdagangan. Umumnya beban seperti ini terletak di daerah pusat perbelanjaan, pasar, atau daerah perkotaan. Peralatan listrik seperti pendingin udara, lampu penerangan, serta mesin berkapasitas kecil biasanya terdapat pada beban bisnis. Beban puncaknya umumnya terjadi pada jam operasional kerja yakni pada siang hingga malam hari.

3. Beban Industri

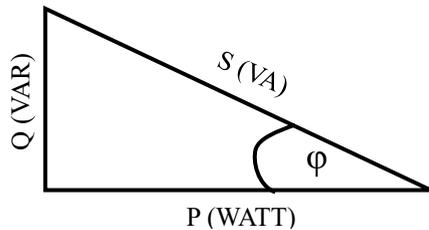
Beban industri adalah jenis beban pada sistem kelistrikan yang terdiri atas pabrik atau perusahaan tertentu. Pada beban industri, daya listrik biasanya disuplai dari penyulang yang berbeda dengan beban rumah tangga dan beban bisnis. Tujuannya agar beban industri mendapatkan suplai daya listrik dengan keandalan dan kualitas yang bagus. Tujuan lainnya adalah untuk mencegah adanya fluktuasi tegangan yang biasa terjadi di industri agar tidak mengganggu peralatan rumah tangga. Hal ini dikarenakan beban industri umumnya memiliki beban seperti motor-motor listrik yang beroperasi selama hampir 24 jam sehari. Beban industri umumnya juga berlokasi terpisah dari pemukiman penduduk serta daerah bisnis atau komersial.

4. Beban Pemerintahan

Beban pemerintahan adalah jenis beban yang digunakan oleh instansi pemerintahan serta penerangan jalan. Beban jenis ini juga dijaga untuk memiliki keandalan dan kualitas daya listrik yang bagus. Umumnya beban seperti ini menjadi prioritas dalam pelayanan daya listrik mengingat perannya yang sangat penting.

2.7 Faktor Daya

Dalam sistem tenaga listrik dikenal tiga jenis daya listrik, yaitu daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S). Ketiga jenis daya listrik ini dapat digambarkan pada sebuah segitiga daya berikut:



Gambar 2.8 Segitiga Daya

Dari gambar segitiga daya tersebut dapat dibuat perbandingan antara masing-masing sisinya.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.28)$$

Faktor daya merupakan perbandingan antara daya semu (S) dengan daya aktif (P). Faktor daya juga bisa dikatakan sebagai parameter yang menunjukkan efisiensi dari jaringan kelistrikan dalam menyalurkan daya yang dapat digunakan. Nilai faktor daya atau $\cos \varphi$ memiliki rentang dari 0 hingga 1. Semakin tinggi nilai faktor daya (mendekati 1) menunjukkan bahwa semakin banyak daya listrik yang bisa digunakan. Sebaliknya, apabila nilainya mendekati 0 artinya faktor dayanya buruk maka semakin sedikit daya listrik yang bisa digunakan.

Di lain hal, $\cos \varphi$ juga menunjukkan hubungan antara perbedaan tegangan dan sudut arus dalam fungsi waktu. $\cos \varphi$ negatif menunjukkan

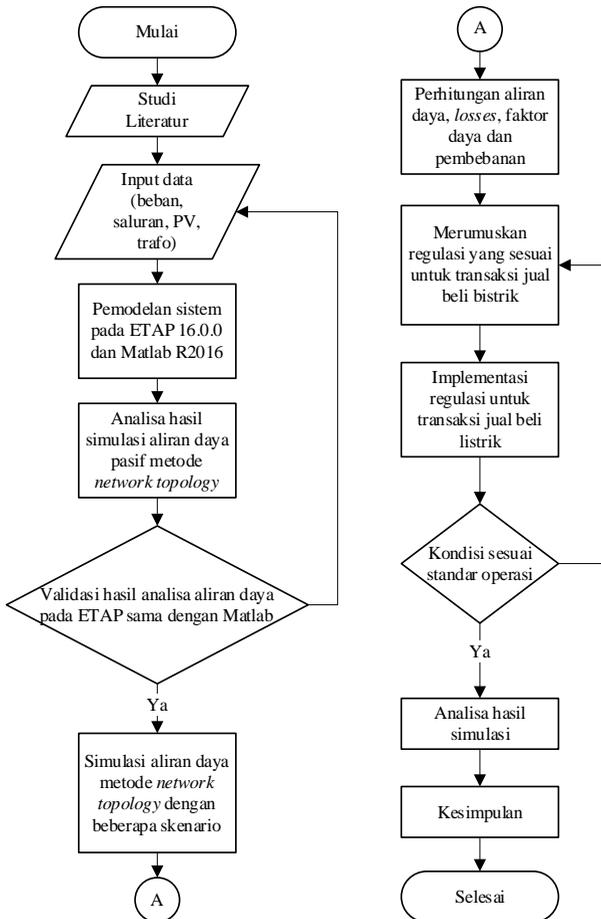
beban bersifat *leading* atau sudut arus mendahului tegangan. Apabila sebaliknya atau $\cos \phi$ positif maka beban bersifat *lagging* dimana sudut arus tertinggal dengan tegangan. Sedangkan keadaan saat sudut arus dan tegangan sefasa disebut dengan *unity* yang terjadi jika jenis beban bersifat resistif murni.

Pada sistem kelistrikan PLN, nilai faktor daya diatur sesuai SPLN 70-1:1985 tentang Pembakuan Istilah Teknik Bidang Kelistrikan [24]. Pada SPLN tersebut ditetapkan standar faktor daya sebesar 0,85. Artinya sistem dengan nilai faktor daya kurang dari 0,85 memiliki kualitas daya yang kurang baik.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *network topology* untuk menyelesaikan perhitungan aliran daya mempertimbangkan sumber PLTS dan beban. Berikut merupakan diagram alir metodologi penelitian pada tugas akhir ini:



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian Tugas Akhir

Adapun penjelasan dari diagram alir metodologi penelitian dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

Tahapan pertama dimulai dengan studi literatur mengenai sistem distribusi, aliran daya metode *network topology*, pengaruh PLTS dan beban, serta transaksi jual beli listrik.

Tahapan kedua adalah melakukan pengumpulan data untuk selanjutnya dilakukan simulasi. Data ini meliputi data beban, saluran, trafo, dan PV. Data-data tersebut didapat dari PLN UID Lampung serta beberapa referensi seperti jurnal dan *paper*.

Tahapan ketiga adalah melakukan pemodelan sistem agar bisa digunakan dalam simulasi. Pemodelan sistem dilakukan berdasarkan data yang sudah didapatkan pada tahapan kedua. Transaksi penjualan energi listrik dimodelkan sebagai injeksi daya listrik oleh PLTS dan transaksi pembelian energi listrik dimodelkan sebagai peningkatan jumlah beban pada sistem. PLTS dimodelkan sebagai *distributed generation* dan juga *negative PQ load*.

Tahapan keempat adalah melakukan simulasi aliran daya menggunakan *software* ETAP 16.0.0 dan Matlab R2016. Hasil simulasi yang didapat adalah tegangan pada bus, rugi daya listrik, faktor daya, dan arus saluran. Hasil simulasi pada *software* Matlab R2016 akan dianalisis dan juga divalidasi menggunakan ETAP 16.0.0 untuk melihat apakah *error* simulasi nilainya sudah kecil.

Tahapan kelima adalah melakukan simulasi pada sistem menggunakan beberapa skenario simulasi. Skenario pertama adalah adanya pembelian energi listrik yang menyebabkan kenaikan beban tanpa adanya penjualan energi listrik dengan belum diimplementasikan regulasi yang mengatur transaksi. Skenario kedua adalah adanya penjualan dan pembelian energi listrik dengan belum diimplementasikan regulasi yang mengaturnya. Skenario terakhir adalah adanya penjualan dan pembelian energi listrik dengan sudah diimplementasikan regulasi untuk transaksi jual beli.

Tahapan keenam adalah merumuskan regulasi dari setiap hasil simulasi untuk mengatur transaksi jual beli listrik. Adanya regulasi ini diharapkan tidak menyebabkan sistem menjadi terganggu akibat transaksi jual beli energi listrik.

Tahapan ketujuh adalah mengimplementasikan setiap regulasi yang dirumuskan pada simulasi. Sehingga, sistem tidak mengalami gangguan ketika terjadi transaksi jual beli energi listrik.

Tahapan kedelapan adalah pengecekan apakah dengan

diterapkannya regulasi kondisi sistem sudah memenuhi standar operasi.

Tahapan kesembilan adalah menganalisa serta merekap hasil simulasi serta regulasi yang diterapkan. Parameter kualitas daya listrik yang dianalisa adalah kondisi tegangan pada bus, rugi daya listrik, faktor daya, dan arus saluran.

Tahapan terakhir adalah penarikan kesimpulan untuk regulasi yang tepat untuk diimplementasikan pada sistem sehingga dengan adanya transaksi jual beli energi listrik atau pengaruh PLTS dan beban sistem tetap stabil dan beroperasi sesuai dengan standar.

3.1 Data Simulasi

Pada tugas akhir ini data-data untuk simulasi didapatkan dari PLN UID Lampung. Simulasi akan dilakukan menggunakan sistem distribusi pada Penyulang Badai 30 Bus. Data-data yang digunakan untuk mendukung simulasi antara lain data beban, data saluran distribusi, data transformator, data komposisi beban, dan data daya terbangkit pada PLTS. Adapun penjelasan dari masing-masing data tersebut adalah sebagai berikut:

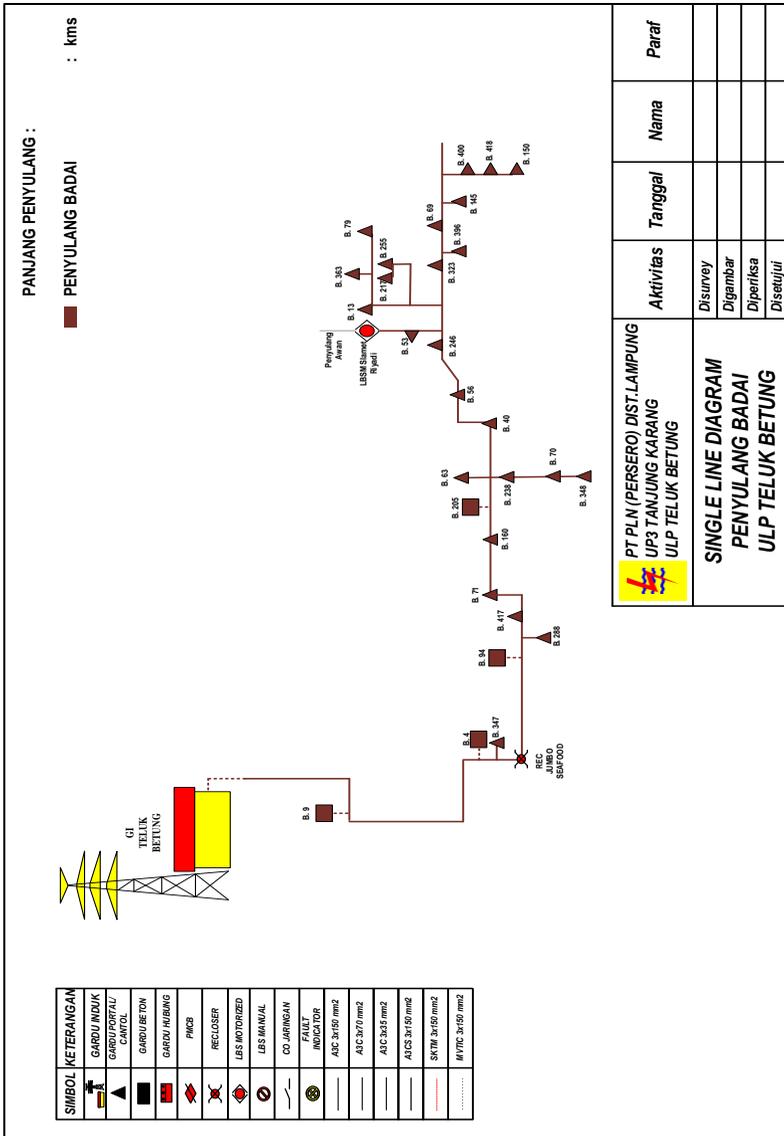
3.1.1 Data Beban dan Saluran Distribusi

Penyulang Badai pada jaringan distribusi Kota Bandar Lampung memiliki bus dengan jumlah 30. Penyulang ini memiliki *rating* tegangan sebesar 20 kV dan pada sisi beban sebesar 0,4 kV. Total beban pada jaringan distribusi Penyulang Badai adalah 1,032 MW dan 1,1169 MVAR yang tersebar pada 29 titik beban. Komposisi dari beban yang ada di Penyulang Badai juga bervariasi. Terdapat beban rumah tangga, beban bisnis atau komersil, dan beban perkantoran, dengan dominasi beban bisnis yang paling tinggi.

Daya listrik pada penyulang badai disalurkan menggunakan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM). Spesifikasi saluran yang digunakan pada Penyulang Badai adalah kabel dengan tipe konduktor AAAC dan luas penampang kabel sebesar 150 mm². Panjang keseluruhan dari penyulang badai ini adalah 7,9310 km.

Penyulang Badai mengaliri listrik untuk enam kelurahan di Kota Bandar Lampung, yakni Kelurahan Talang, Kelurahan Gedong Pakuon, Kelurahan Pesawahan, Kelurahan Kangkung, Kelurahan Bumi Waras, dan Kelurahan Sukaraja.

Topologi jaringan dari Penyulang Badai adalah radial seperti terlihat pada gambar berikut:



Gambar 3.2 Single Line Diagram Penyulang Badai

Data beban pada masing-masing bus dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3.1 Data Beban Penyulang Badai

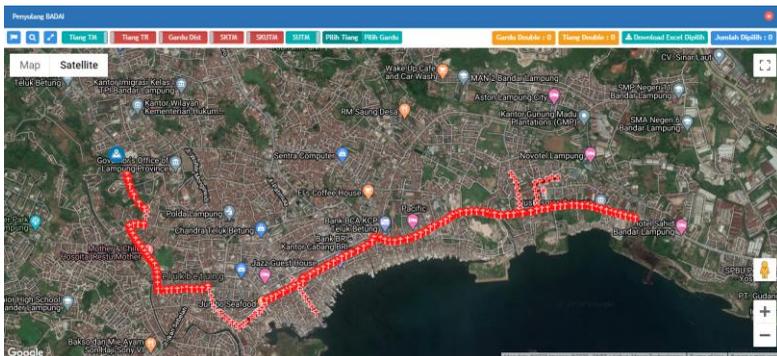
Bus	ID Beban	Beban	
		MW	MVAR
2	B.9	0,0604	0,0374
3	B.4	0,1000	0,0622
4	B.347	0,0782	0,0485
5	B.94	0,0629	0,0390
6	B.288	0,0425	0,0263
7	B.417	0,0425	0,0263
8	B.71	0,0926	0,0574
9	B.160	0,0663	0,0411
10	B.205	0,1700	0,1050
11	B.63	0,0043	0,0026
12	B.40	0,0859	0,0533
13	B.238	0,0306	0,0190
14	B.70	0,1160	0,0716
15	B.348	0,1260	0,0779
16	B.56	0,0935	0,0579
17	B.246	0,0595	0,0369
18	B.53	0,0518	0,0321
19	B.323	0,0629	0,0389
20	B.13	0,0680	0,0421
21	B.363	0,0842	0,0522
22	B.79	0,0383	0,0237
23	B.396	0,0298	0,0184
24	B.69	0,0663	0,0411
25	B.145	0,0315	0,0195

Tabel 3.1 Data Beban Penyulang Badai (Lanjutan)

Bus	ID Beban	Beban	
		MW	MVAR
26	B.400	0,0425	0,0263
27	B.418	0,0094	0,0058
28	B.150	0,0272	0,0169
29	B.255	0,0425	0,0263
30	B.217	0,0179	0,0111
Total		1,8031	1,1167

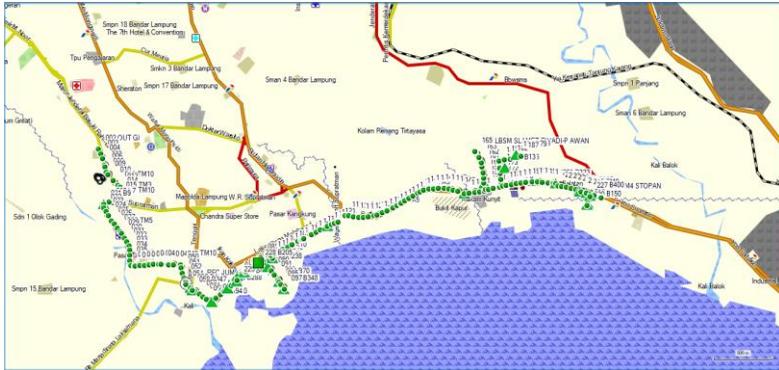
Sistem pada Penyulang Badai adalah sistem tiga fasa yang diasumsikan seimbang, dimana fasa R, S, dan T nilainya sama untuk impedansi dan beban. Sehingga, pada penelitian tugas akhir ini digunakan salah satu fasanya saja.

Data saluran berisi informasi nilai impedansi yang digunakan untuk perhitungan dalam simulasi. Data saluran ini didapatkan dengan melakukan pengamatan pada peta feeder menggunakan *software* Amadis dan Garmin. Hal ini bertujuan agar simulasi menjadi lebih valid dan akurat.



Gambar 3.3 *Software* Amadis

Berikut adalah Penyulang Badai yang ditampilkan pada *software* Garmin MapSource:



Gambar 3.4 Software Garmin MapSource

Data saluran pada jaringan distribusi Penyulang Badai dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3.2 Data Saluran Distribusi Penyulang Badai

Bus	ke Bus	R (ohm/km)	X ohm/km	Panjang (KM)
		0,2100	0,3736	
1	2	0,1229	0,2185	0,585
2	3	0,2310	0,4109	1,100
3	4	0,0945	0,1681	0,450
4	5	0,1281	0,2279	0,610
5	6	0,0647	0,1151	0,308
6	7	0,0210	0,0374	0,100
7	8	0,0315	0,0560	0,150
8	9	0,0357	0,0635	0,170
9	10	0,0336	0,0598	0,160
10	11	0,0315	0,0560	0,150
10	12	0,1365	0,2428	0,650
10	13	0,0105	0,0187	0,050
13	14	0,0210	0,0374	0,100

Tabel 3.2 Data Saluran Distribusi Penyulang Badai (Lanjutan)

Bus	ke Bus	R (ohm/km)	X ohm/km	Panjang (KM)
		0,2100	0,3736	
14	15	0,0105	0,0187	0,050
12	16	0,1449	0,2578	0,690
16	17	0,0483	0,0859	0,230
17	18	0,1504	0,2675	0,716
18	19	0,0252	0,0448	0,120
19	20	0,0454	0,0807	0,216
20	21	0,0206	0,0366	0,098
21	22	0,0206	0,0366	0,098
19	23	0,1134	0,2017	0,540
23	24	0,0567	0,1009	0,270
24	25	0,0105	0,0187	0,050
25	26	0,0105	0,0187	0,050
26	27	0,0105	0,0187	0,050
27	28	0,0105	0,0187	0,050
19	29	0,0147	0,0261	0,070
29	30	0,0105	0,0187	0,050
Panjang Penyulang				7,9310 KM

3.1.2 Data Transformator

Transformator pada jaringan distribusi Penyulang Badai merupakan transformator beban. Transformator ini mengubah nilai tegangan menengah 20 kV ke level tegangan rendah 0,4 kV atau disebut dengan trafo *step down*. Data transformator pada sistem ini ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 3.3 Data Transformator

Bus	Kapasitas (MVA)	Impedansi (p.u)	R (p.u)	X (p.u)
2	0,30	6,75	6,424	2,072
3	0,40	6,75	6,424	2,072
4	0,25	6,75	6,424	2,072
5	0,20	6,75	6,424	2,072
6	0,15	6,75	6,424	2,072
7	0,15	6,75	6,424	2,072
8	0,25	6,75	6,424	2,072
9	0,20	6,75	6,424	2,072
10	0,60	6,75	6,424	2,072
11	0,23	6,75	6,424	2,072
12	0,27	6,75	6,424	2,072
13	0,10	6,75	6,424	2,072
14	0,30	6,75	6,424	2,072
15	0,40	6,75	6,424	2,072
16	0,25	6,75	6,424	2,072
17	0,19	6,75	6,424	2,072
18	0,20	6,75	6,424	2,072
19	0,16	6,75	6,424	2,072
20	0,16	6,75	6,424	2,072
21	0,25	6,75	6,424	2,072
22	0,25	6,75	6,424	2,072
23	0,20	6,75	6,424	2,072
24	0,20	6,75	6,424	2,072
25	0,16	6,75	6,424	2,072
26	0,20	6,75	6,424	2,072
27	0,20	6,75	6,424	2,072
28	0,20	6,75	6,424	2,072
29	0,10	6,75	6,424	2,072
30	0,10	6,75	6,424	2,072

3.1.3 Data Komposisi Beban

Beban yang ada pada Penyulang Badai memiliki komposisi yang bermacam-macam. Terdapat beban rumah tangga, beban bisnis atau komersial, dan beban perkantoran. Komposisi beban ini terdapat pada tabel berikut:

Tabel 3.4 Data Komposisi Beban

Bisnis	Rumah Tangga	Kantor/Pemerintahan/Fasum	Jumlah Pelanggan
3.651	2.191	1.460	7.302
Sumber: Data Niaga PLN UID Lampung			

3.1.4 Data Daya Terbangkit PLTS

Data daya terbangkit PLTS mengacu pada referensi [7]. Data ini bervariasi menyesuaikan dengan jenis bebannya. Beban bisnis dan beban perkantoran memiliki daya terbangkit PLTS lebih besar dibanding beban rumah tangga. Data daya terbangkit PLTS merupakan data tiap pelanggan. Data ini terdapat pada tabel berikut:

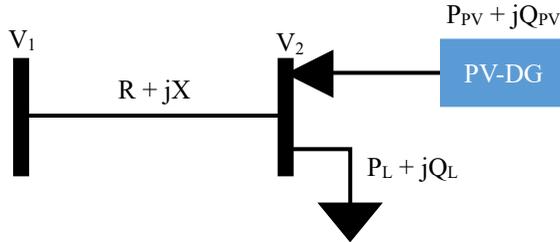
Tabel 3.5 Data Daya Terbangkit PLTS

Bisnis	Rumah Tangga	Kantor/Pemerintahan/Fasum
7,2 kW	3,6 kW	7,2 kW

Data di atas juga mempertimbangkan luasan dari *rooftop* dari pelanggan, dimana beban rumah tangga diasumsikan memiliki luasan *rooftop* sebesar 24 m² dengan produksi energi tiap tahun sebesar 6.570 kWh, sedangkan untuk beban bisnis dan perkantoran diasumsikan memiliki luasan *rooftop* sebesar 48 m² dengan produksi energi tiap tahun 13.140 kWh.

3.2 Pemodelan PV-DG sebagai *Negative PQ Load*

PLTS atau PV-DG pada tugas akhir ini akan dimodelkan sebagai *negative PQ load*. Nilai MW dan MVAR pada beban akan dikompensasi atau dikurangi dengan nilai MW dan MVAR yang terbangkit pada PLTS. Adanya pembangkit pada sisi beban menyebabkan arah aliran dayanya berlawanan dengan arah aliran daya pada beban. Sehingga, PLTS yang terhubung pada beban dapat dimodelkan sebagai *negative PQ load*. Karakteristik antara beban dan pembangkit pun berbeda, dimana pembangkit menyuplai daya sedangkan beban menyerap daya. Dalam analisis nantinya, terhubungnya PLTS akan dinyatakan sebagai beban yang bernilai negatif.



Gambar 3.5 PV-DG sebagai *negative PQ load*

Konsep PV-DG atau PLTS sebagai *negative PQ load* dapat dilihat dari gambar diatas. Ketika pada bus \$V_2\$ dipasang PV-DG dengan kapasitas sebesar \$P_{PV} + jQ_{PV}\$ dan total beban terpasang adalah \$P_L + Q_L\$, maka nilai P dan Q pada bus dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P + jQ = (P_L - P_{PV}) + j(Q_L - Q_{PV}) \quad (3.1)$$

3.3 Batasan untuk Regulasi Transaksi

3.3.1 Batasan Teknis

Dalam merumuskan regulasi yang akan diimplementasikan dalam transaksi jual beli listrik digunakan beberapa batasan atau *constraint* yang bertujuan agar sistem tidak terganggu dengan adanya transaksi tersebut. Batasan atau *constraint* adalah aturan berupa parameter nilai yang harus dilalui dalam transaksi ini. Batasan ini membuat proses transaksi menjadi lebih aman. Berikut adalah batasan yang digunakan dalam tugas akhir ini:

Batasan pertama yang digunakan adalah batasan tegangan. Nilai batasan tegangan ini mengacu pada [25]. Batasan tegangan pada tugas akhir ini adalah:

$$V_{min} < V_{bus} < V_{maks} \quad (3.2)$$

$$V_{min} = \frac{V_{base} - 10\% \times V_{base}}{V_{base}} \quad (3.3)$$

$$V_{maks} = \frac{V_{base} + 5\% \times V_{base}}{V_{base}} \quad (3.4)$$

Nilai diatas merupakan batasan atau standar toleransi tegangan

yang diperbolehkan pada bus untuk transaksi jual beli listrik.

Batasan selanjutnya adalah batasan maksimum untuk arus saluran dan pembebanan trafo. Nilai yang diperbolehkan saat terjadi transaksi jual beli listrik adalah:

$$I_{maks} < 400 A \quad (3.5)$$

$$\%Loading \leq 80\% \times Kapasitas Transformator \quad (3.6)$$

Batasan ketiga adalah nilai faktor daya pada bus gardu induk yang nilainya tidak boleh dibawah 0,85.

$$0,85 \leq pf_{bus} \leq 1 \quad (3.7)$$

3.3.2 Batasan Ekonomi

Selain batasan teknis yang digunakan agar jaringan distribusi tidak mengalami gangguan, digunakan pula batasan ekonomi untuk mengatur transaksi jual beli agar tidak merugikan tengkulak atau *energy retailer*. Batasan ini mengatur kapasitas penjualan maupun pembelian energi listrik oleh pelanggan. Batasan ekonomi yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$kWh \text{ jual} \leq kWh \text{ beli} \quad (3.8)$$

Pelanggan diperbolehkan menjual energi listrik dari PLTS dengan syarat jumlah yang dijual tidak melebihi konsumsi daya listriknya. Apabila penjualan sudah mencapai batas maksimal dalam satu bulan, maka transaksi penjualan untuk bulan tersebut akan dihentikan. Pelanggan dapat melakukan transaksi kembali pada bulan berikutnya.

Regulasi atau batasan ini akan mengamankan tengkulak dari kerugian. Sesuai dengan analisis berikut:

Asumsikan:

p = Harga pembelian energi listrik

q = Harga penjualan energi listrik

Nilai X dan Y dianggap sama untuk transaksi jual beli energi listrik, maka:

- Apabila terjadi transaksi penjualan energi listrik kepada tengkulak dengan jumlah kWh jual lebih besar dari kWh beli, maka tengkulak

akan mengalami kerugian:

$$kWh \text{ jual} \times p \geq kWh \text{ beli} \times q \quad (3.8)$$

Dimana tengkulak akan membayar lebih besar dari energi listrik yang terjual, sedangkan pembelian energi listrik lebih kecil nilainya.

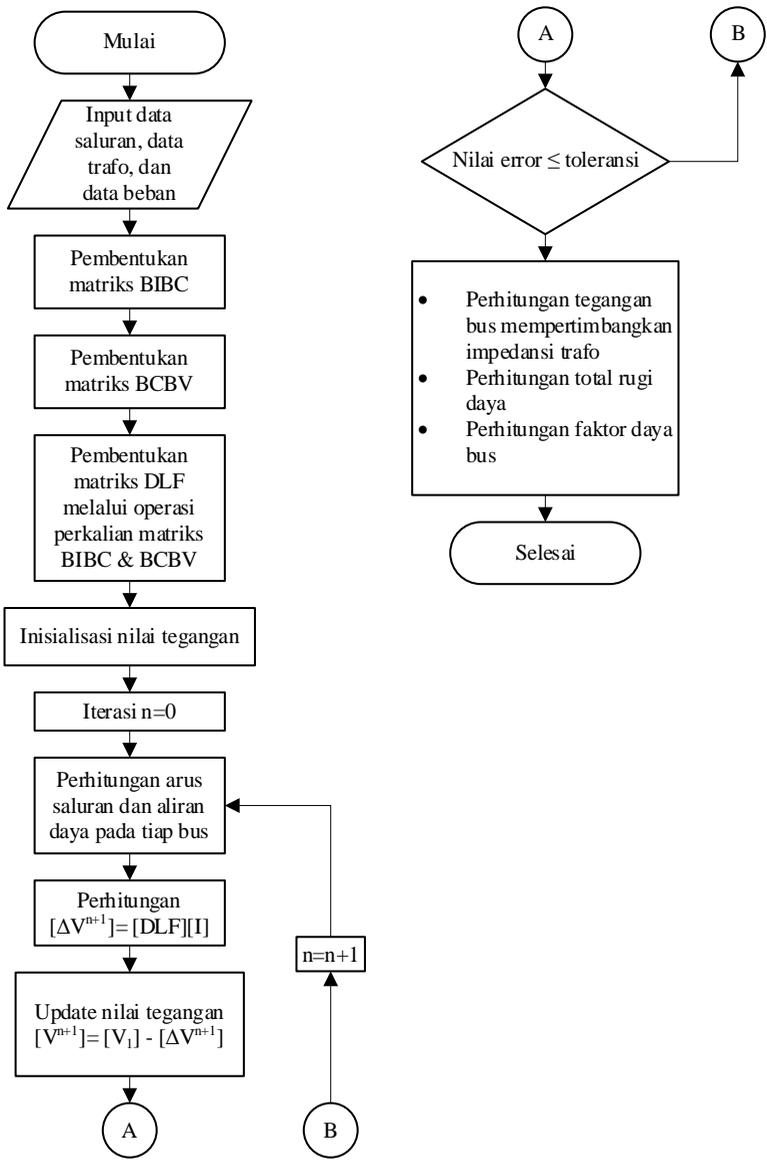
- Apabila regulasi transaksi diterapkan dengan melakukan pembatasan jumlah energi listrik yang dijual oleh pelanggan, maka tengkulak tidak akan mengalami kerugian:

$$kWh \text{ jual} \times p \leq kWh \text{ beli} \times q \quad (3.8)$$

Dari batasan-batasan tersebut akan digunakan sebagai regulasi untuk menentukan apakah transaksi jual beli listrik dapat dilakukan atau tidak. Ketika transaksi melanggar batasan-batasan diatas maka transaksi tidak dapat terjadi.

3.4 Penerapan Metode *Network Topology*

Data yang sudah didapatkan selanjutnya akan digunakan dalam simulasi aliran daya. Metode yang digunakan dalam perhitungan aliran daya adalah metode *network topology*. Tahapan mengenai cara kerja dari metode *network topology* dalam perhitungan aliran daya adalah sebagai berikut:



Gambar 3.6 Diagram Alir Penerapan Metode *Network Topology*

Pertama, data saluran, data trafo, dan data beban akan dimasukkan dalam simulasi. Data saluran yang digunakan dalam simulasi berupa impedansi R dan X, data trafo berupa kapasitas trafo dalam satuan MVA dan impedansi trafo dalam satuan per unit (p.u), sedangkan data beban berupa nilai MW dan MVAR beban.

Kedua, *single line diagram* yang digunakan untuk simulasi akan diubah dalam bentuk matriks BIBC. Matriks BCBV juga akan dibentuk melalui matriks BIBC. Kedua matriks ini dikalikan dan akan menghasilkan matriks DLF untuk perhitungan pada tahap selanjutnya.

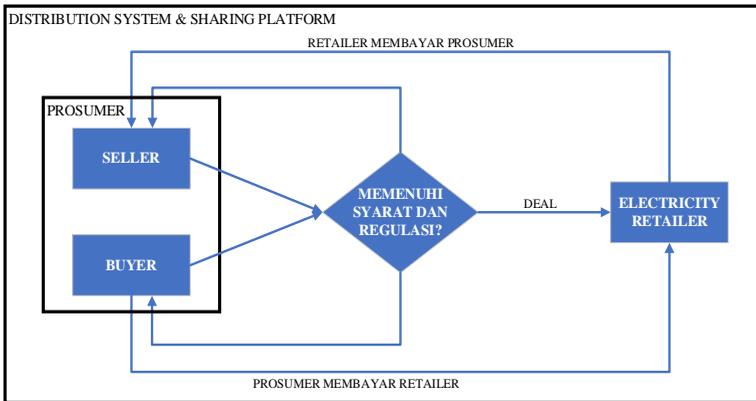
Selanjutnya, nilai tegangan diinisialisasi sebagai nilai awal untuk perhitungan. Kemudian dilakukan iterasi perhitungan arus saluran dan aliran daya serta tegangan pada tiap bus. Nilai yang didapat pada setiap iterasi akan digunakan untuk iterasi selanjutnya. Proses ini dilakukan terus menerus hingga didapat error simulasi bernilai kurang dari atau sama dengan nilai toleransi perhitungan yang ditetapkan.

Apabila nilai-nilai pada tahap di atas sudah didapatkan, kemudian dilakukan perhitungan nilai tegangan bus dengan mempertimbangkan impedansi trafo, perhitungan total rugi daya, dan perhitungan faktor daya bus. Proses ini merupakan tahapan terakhir dalam simulasi.

3.5 Skema dan Regulasi Transaksi Jual Beli Listrik

Perumusan regulasi dalam transaksi jual beli listrik menggunakan beberapa referensi. Transaksi penjualan energi listrik mengacu pada [18] dan untuk pembelian energi listrik mengacu pada program Sambungan Sementara PLN. Standar seperti SPLN juga digunakan dalam penentuan regulasi.

Skema dari transaksi jual beli listrik pada tugas akhir ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 3.7 Skema Transaksi Jual Beli Listrik

Pada skema yang ditunjukkan oleh gambar diatas, terdapat tiga pelaku dalam transaksi jual beli listrik, yakni *prosumer* yang dapat berlaku sebagai penjual atau pembeli dan *electricity retailer* atau tengkulak yang akan membeli atau menjual energi listrik serta memfasilitasi jaringan kelistrikan. Pada proses transaksi penjualan, penjual akan menjual kelebihan daya listrik pada tengkulak. Apabila proses penjualan daya listrik memenuhi standar dan regulasi, maka transaksi akan berlangsung atau *deal* dan tengkulak akan membayar daya listrik yang terjual kepada penjual. Apabila proses penjualan daya listrik tidak memenuhi standar dan regulasi maka proses akan dikembalikan kepada penjual untuk mengurangi atau menambah daya listrik yang dijual. Untuk proses pembelian energi listrik, pembeli akan melakukan permohonan pembelian energi listrik. Apabila permintaan pembelian energi listrik sesuai dengan standar dan regulasi, maka transaksi dapat berlangsung atau *deal*, dan pembeli melakukan pembayaran pada tengkulak sesuai energi listrik yang dibeli. Apabila tidak, maka proses pembelian energi listrik dikembalikan kepada pembeli untuk dikurangi atau ditambah kapasitasnya.

Hasil simulasi pada skenario 1 dan 2 digunakan sebagai acuan dalam perumusan skema dan regulasi yang mengatur transaksi jual beli listrik. Regulasi ini mempertimbangkan batasan tegangan pada bus, arus saluran, pembebanan transformator, dan faktor daya pada bus gardu induk. Regulasi yang akan diterapkan pada transaksi jual beli listrik ini adalah sebagai berikut:

1. Kapasitas maksimum pembelian energi listrik dapat dilakukan hingga pembebanan transformator mencapai nilai pembebanan sebesar 80% dari kapasitasnya. Pembatasan ini bertujuan agar pembebanan transformator tidak berlebih sesuai [20] dan arus pada sistem tidak melebihi batas sesuai [23].
2. Kapasitas maksimum penjualan energi listrik dapat dilakukan hingga 100% dari kapasitas daya listrik langganan. Pembatasan ini bertujuan agar tidak terjadi fenomena seperti *overvoltage*, *reverse power flow*, dan arus saluran yang berlebih.
3. Pelanggan yang melakukan transaksi penjualan energi listrik juga diwajibkan untuk melengkapi perangkat PV dengan *inverter*, sistem pengaman, dan sambungan listrik.
4. Transaksi jual beli listrik dapat dilakukan dengan mengajukan permohonan pada *electricity retailer* maksimal pada satu hari sebelum terjadinya transaksi atau H-1.

Regulasi ini akan digunakan dalam simulasi skenario 3 pada bab selanjutnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hasil dari simulasi dan analisis mengenai hasil tersebut. Pada tugas akhir ini, analisa aliran daya menggunakan metode *network topology* dimodelkan pada *software* Matlab R2016a dan hasilnya divalidasi menggunakan metode *Newton-Raphson* pada *software* ETAP 16.0.0. Tujuan dari validasi ini adalah untuk mengetahui apakah program aliran daya pada Matlab sudah sesuai.

Analisa aliran daya merupakan bahasan utama pada tugas akhir ini. Terdapat tiga skenario yang telah dilakukan simulasi. Hasil simulasi dilakukan analisa untuk mengetahui pengaruh sumber PLTS dan beban.

Tujuan akhir dari analisa aliran daya pada tugas akhir ini adalah mengetahui apa saja pengaruh sumber PLTS dan beban terhadap kualitas daya listrik pada sistem. Parameter dalam melakukan analisa antara lain adalah tegangan bus, rugi daya listrik, arus saluran, dan faktor daya. Kemudian setelah mengetahui pengaruh dari sumber PLTS dan beban akan dirumuskan regulasi yang tepat untuk mengatur transaksi jual beli energi listrik.

Penjelasan pada bab ini meliputi beberapa bagian yaitu:

1. Validasi Simulasi dan Analisis pada Kondisi Awal
2. Simulasi dan Analisis pada Skenario 1
3. Simulasi dan Analisis pada Skenario 2
4. Simulasi dan Analisis pada Skenario 3
5. Perumusan Regulasi yang Tepat untuk Transaksi Jual Beli Energi Listrik.

4.1 Validasi Simulasi dan Analisis pada Kondisi Awal

Simulasi pada kondisi awal merupakan simulasi tanpa adanya pengaruh dari PLTS dan beban. Simulasi dilakukan pada *software* Matlab dan ETAP untuk mengetahui apakah hasilnya sudah valid. Data-data yang didapatkan dari hasil simulasi pada kedua *software* tersebut kemudian dibandingkan. Simulasi dilakukan dengan nilai tegangan *base* sistem sebesar 20 kV dan MVA *base* sebesar 100 MVA. Toleransi *error* yang digunakan dalam simulasi adalah sebesar 0,0001. Hasil pemodelan simulasi jaringan distribusi Penyulang Badai pada *software* ETAP terdapat pada bagian lampiran.

Data hasil simulasi menunjukkan bahwa simulasi pada Matlab dan ETAP terdapat selisih atau *error* yang bernilai kecil. Hal ini menunjukkan

bahwa hasil simulasi aliran daya antara keduanya adalah valid. Berikut adalah tabel hasil simulasi pada Matlab dan ETAP:

Tabel 4.1 Tegangan Bus Penyulang Badai

Bus	Tegangan (p.u)		
	Topology Network	Newton Raphson	Error (%)
1	1	1	0,0000000
2	0,9988207	0,9988	0,0000208
3	0,9966656	0,9966	0,0000658
4	0,9958618	0,9957	0,0001625
5	0,9948018	0,9947	0,0001024
6	0,9942928	0,9941	0,0001939
7	0,9941291	0,9940	0,0001299
8	0,9938869	0,9937	0,0001881
9	0,9936397	0,9935	0,0001406
10	0,9933805	0,9932	0,0001817
11	0,9934143	0,9932	0,0002158
12	0,9928253	0,9926	0,0002270
13	0,9934044	0,9932	0,0002058
14	0,9933690	0,9932	0,0001702
15	0,9933553	0,9932	0,0001563
16	0,9922689	0,9920	0,0002711
17	0,9921125	0,9919	0,0002142
18	0,9916528	0,9914	0,0002550
19	0,9915858	0,9913	0,0002883
20	0,9915400	0,9913	0,0002421
21	0,9915242	0,9913	0,0002262
22	0,9915162	0,9913	0,0002181
23	0,9914592	0,9913	0,0001606
24	0,9914061	0,9912	0,0002079

Tabel 4.1 Tegangan Bus Penyulang Badai (Lanjutan)

Bus	Tegangan (p.u)		
	Topology Network	Newton Raphson	Error (%)
25	0,9914024	0,9912	0,0002041
26	0,9913955	0,9912	0,0001972
27	0,9913935	0,9912	0,0001952
28	0,9913919	0,9912	0,0001937
29	0,9915838	0,9913	0,0002863
30	0,9915828	0,9913	0,0002853

Hasil simulasi tegangan yang ditunjukkan pada tabel di atas menjelaskan bahwa pada jaringan distribusi Penyulang Badai dengan *base voltage* sebesar 20 kV mempunyai nilai tegangan yang normal. Nilai-nilai tegangan pada tabel tersebut masih sesuai dengan standar tegangan SPLN 1:1995, yakni sebesar 1,05 p.u untuk batasan *overvoltage* dan 0,9 p.u untuk batasan *undervoltage*. Hal ini dikarenakan nilai impedansi saluran pada Penyulang Badai yang relatif kecil sebagai akibat dari jarak antar bus yang juga terhitung pendek apabila dibandingkan dengan penyulang lain di ULP Teluk Betung. Sehingga *drop* tegangan pada sistem juga rendah.

Nilai tegangan terendah pada sistem adalah 0,9913919 p.u. Nilai tersebut terdapat pada bus 28 dimana bus ini memiliki lokasi paling jauh pada sistem dibandingkan dengan bus-bus lainnya. Lokasi ini diukur dari sumber atau gardu induk. Pada simulasi tegangan, hasil simulasi dengan metode *Network Topology* divalidasi dengan metode *Newton-Raphson* dan didapatkan nilai *error* simulasi paling besar adalah 0,0002883% di bus 19.

Hasil simulasi selanjutnya adalah arus pada saluran sistem distribusi Penyulang Badai yang dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.2 Arus Tiap Saluran Penyulang Badai

Bus	Ke Bus	Arus Saluran (A)		
		Topology Network	Newton Raphson	Error (%)
1	2	61,640	62,87	0,01956418
2	3	59,590	60,8	0,01990132
3	4	56,180	57,32	0,01988835
4	5	53,520	54,6	0,01978022
5	6	51,370	52,41	0,01984354
6	7	49,920	50,93	0,01983114
7	8	48,460	49,46	0,02021836
8	9	45,300	46,21	0,01969271
9	10	43,030	43,9	0,01981777
10	11	0,145	0,145	0,00137931
10	12	27,770	28,33	0,01976703
10	13	9,310	9,508	0,02082457
13	14	8,270	8,441	0,02025826
14	15	4,310	4,389	0,01799954
12	16	24,830	25,33	0,01973944
16	17	21,630	22,05	0,01904762
17	18	19,590	19,97	0,01902854
18	19	17,820	18,17	0,01926252
19	20	6,521	6,664	0,02145858
20	21	4,190	4,269	0,01850550
21	22	1,310	1,323	0,00982615
19	23	7,080	7,177	0,01351540
23	24	6,060	6,148	0,01431360
24	25	3,790	3,828	0,00992685
25	26	2,710	2,737	0,00986482
26	27	1,250	1,261	0,00872324
27	28	0,930	0,94	0,01063830
19	29	2,070	2,115	0,02127660
29	30	0,610	0,618	0,01294498

Dari tabel di atas dapat diketahui bahwa nilai arus terbesar terdapat pada saluran yang menghubungkan antara bus 1 dengan bus 2. Nilai ini sebesar 61,640 A atau 15,41% dari pembebanan saluran dan tergolong aman untuk batas Kapasitas Hantar Arus saluran yang nilai maksimumnya sebesar 425 A dengan klasifikasi *overload* apabila sudah menyentuh nilai 400 A. Nilai tersebut merupakan nilai arus saluran dari bus gardu induk yang menghubungkan ke Penyulang Badai. Hasil validasi antara simulasi Matlab dan ETAP didapatkan nilai *error* terbesar mencapai 0,02145858%, yakni pada saluran yang menghubungkan bus 19 ke bus 20.

Hasil simulasi selanjutnya adalah nilai faktor daya pada masing-masing bus yang dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.3 Faktor Daya Tiap Bus Penyulang Badai

Bus	Faktor Daya		
	Topology Network	Newton Raphson	Error (%)
1	0,853260870	0,84051037	0,015169953
2	0,849765258	0,84000000	0,011625307
3	0,849514563	0,83992377	0,011418643
4	0,850515464	0,84016186	0,012323343
5	0,845794393	0,83930211	0,007735332
6	0,847457627	0,84044321	0,008346089
7	0,848837209	0,84036488	0,010081727
8	0,850299401	0,84028186	0,011921649
9	0,852564103	0,84035198	0,014532152
10	0,851351351	0,83984116	0,013705195
11	0,852000000	0,80000000	0,065000000
12	0,852631579	0,84086242	0,013996530
13	0,843750000	0,84097859	0,003295455
14	0,857142857	0,84137931	0,018735363
15	0,866666667	0,84105960	0,030446194
16	0,858823529	0,84156142	0,020511997
17	0,851351351	0,84147952	0,011731512
18	0,850746269	0,84110787	0,011459169

Tabel 4.3 Faktor Daya Tiap Bus Penyulang Badai (Lanjutan)

Bus	Faktor Daya		
	Topology Network	Newton Raphson	Error (%)
19	0,852459016	0,84134615	0,013208431
20	0,863636364	0,83842795	0,030066288
21	0,857142857	0,84246575	0,017421603
22	0,850000000	0,844444444	0,006578947
23	0,875000000	0,84552846	0,034855769
24	0,857142857	0,84360190	0,016051364
25	0,846153846	0,84732824	0,001386001
26	0,888888889	0,85106383	0,044444444
27	0,850000000	0,83720930	0,015277778
28	0,850000000	0,84375000	0,007407407
29	0,857142857	0,84722222	0,011709602
30	0,850000000	0,85714286	0,008333333

Analisa nilai faktor daya pada sistem dilakukan pada bus 1. Bus 1 merupakan bus gardu induk pada Penyulang Badai. Pada tabel dapat dilihat bahwa nilai faktor daya pada Penyulang Badai adalah sebesar 0,853260870. Nilai ini berada pada kondisi normal atau sesuai standar SPLN 70-1:1985. Pada SPLN tersebut ditetapkan standar faktor daya sebesar 0,85. Artinya sistem dengan nilai faktor daya kurang dari 0,85 memiliki kualitas daya yang kurang baik. Hasil validasi menggunakan ETAP menunjukkan terdapat *error* simulasi sebesar 0,015169953%.

Hasil simulasi selanjutnya adalah nilai rugi daya aktif pada Penyulang Badai:

Tabel 4.4 Rugi Daya Aktif Penyulang Badai

Bus	Ke Bus	Rugi Daya Aktif (kW)		
		Topology Network	Newton Raphson	Error (%)
1	2	1,401000	1,457	0,03843514
2	3	2,461000	2,561	0,03904725
3	4	0,895000	0,932	0,03969957

Tabel 4.4 Rugi Daya Aktif Penyulang Badai (Lanjutan)

Bus	Ke Bus	Rugi Daya Aktif (kW)		
		Topology Network	Newton Raphson	Error (%)
4	5	1,101000	1,146	0,03926702
5	6	0,512000	0,533	0,03939962
6	7	0,157000	0,163	0,03680982
7	8	0,222000	0,231	0,03896104
8	9	0,220000	0,229	0,03930131
9	10	0,187000	0,194	0,03608247
10	11	0,000000	0	0,00000000
10	12	0,316000	0,329	0,03951368
10	13	0,003000	0,003	0,00000000
13	14	0,004000	0,0039	0,02564103
14	15	0,003000	0,004	0,25000000
12	16	0,268000	0,162	0,65432099
16	17	0,068000	0,05	0,36000000
17	18	0,173000	0,18	0,03888889
18	19	0,024000	0,025	0,04000000
19	20	0,006000	0,006	0,00000000
20	21	0,001000	0,0011	0,09090909
21	22	0,000000	0	0,00000000
19	23	0,001000	0,001	0,00000000
23	24	0,006000	0,005	0,20000000
24	25	0,005000	0,006	0,16666667
25	26	0,000000	0	0,00000000
26	27	0,000000	0	0,00000000
27	28	0,000000	0	0,00000000
19	29	0,000000	0	0,00000000
29	30	0,000000	0	0,00000000
Total		8,034000	8,222000	0,02286548

Pada tabel di atas terlihat bahwa total rugi daya aktif pada Penyulang Badai adalah sebesar 8.034 kW untuk kondisi normal. Hasil ini divalidasi menggunakan ETAP dan didapat nilai *error* terbesar adalah 0.39552239%.

Tabel selanjutnya merupakan tabel hasil simulasi untuk rugi daya reaktif pada Penyulang Badai:

Tabel 4.5 Rugi Daya Reaktif Penyulang Badai

Bus	Ke Bus	Rugi Daya Reaktif (kVAR)		
		Topology Network	Newton Raphson	Error (%)
1	2	2,491	2,591	0,038595
2	3	4,378	4,556	0,039069
3	4	1,592	1,657	0,039228
4	5	1,958	2,038	0,039254
5	6	0,911	0,949	0,040042
6	7	0,28	0,291	0,037801
7	8	0,395	0,411	0,038929
8	9	0,391	0,407	0,039312
9	10	0,332	0,346	0,040462
10	11	0	0	0,000000
10	12	0,562	0,584	0,037671
10	13	0,005	0,005	0,000000
13	14	0,008	0,007	0,142857
14	15	0,001	0,001	0,000000
12	16	0,477	0,25	0,908000
16	17	0,121	0,1	0,210000
17	18	0,308	0,32	0,037500
18	19	0,043	0,044	0,022727
19	20	0,01	0,011	0,090909
20	21	0,002	0,001	1,000000
21	22	0	0	0,000000
19	23	0,03	0,02	0,500000

Tabel 4.5 Rugi Daya Reaktif Penyulang Badai (Lanjutan)

Bus	Ke Bus	Rugi Daya Reaktif (kVAR)		
		Topology Network	Newton Raphson	Error (%)
23	24	0,011	0,01	0,100000
24	25	0,01	0,011	0,090909
25	26	0,001	0,001	0,000000
26	27	0	0	0,000000
27	28	0	0	0,000000
19	29	0	0	0,000000
29	30	0	0	0,000000
Total		14,317	14,387	0,020535

Tabel di atas menunjukkan total rugi daya reaktif pada Penyulang Badai adalah sebesar 14,317 kVAR. Nilai *error* simulasi terbesar adalah 1,00000%. Rugi daya dipengaruhi oleh nilai impedansi saluran. Selain impedansi, arus saluran juga berpengaruh terhadap nilai rugi daya. Kedua variabel tersebut berbandung lurus dengan rugi daya saluran. Semakin kecil nilai impedansi dan arus saluran maka rugi dayanya juga semakin kecil, begitu pula sebaliknya.

Pada tabel tersebut, terdapat beberapa saluran dengan nilai rugi daya 0 kW atau 0 kVAR. Hal ini terjadi karena nilai arus saluran yang sangat kecil serta impedansi saluran juga kecil. Secara perhitungan terdapat nilai rugi dayanya, namun karena nilainya sangat kecil maka hasil simulasi menunjukkan nilai yang mendekati 0.

Pada kondisi normal di Penyulang Badai, nilai arus saluran relatif kecil dan impedansi saluran juga kecil nilainya. Sehingga total rugi daya aktif dan rugi daya reaktif menjadi kecil nilainya.

4.2 Simulasi dan Analisis pada Skenario 1

Pada skenario 1 dilakukan simulasi pada Penyulang Badai dengan penambahan kapasitas beban hingga mencapai persentasi maksimum dari pembebanan trafo distribusi. Simulasi kenaikan beban hingga *loading* trafo mencapai nilai 100% dari kapasitasnya. Pada simulasi ini belum diterapkan regulasi yang mengatur transaksi jual beli energi listrik.

Simulasi ini dilakukan dengan asumsi bahwa terdapat permintaan penambahan beban dari pelanggan atau konsumen. Penambahan

kapasitas beban dilakukan pada semua titik beban. Kenaikan kapasitas beban ini mengacu pada program Sambungan Listrik Sementara oleh PLN, dimana pelanggan dapat melakukan penambahan beban dalam jangka waktu tertentu atau sementara. Simulasi ini juga diasumsikan sebagai transaksi pembelian energi listrik.

Setelah dilakukan penambahan kapasitas beban, total kapasitas beban pada sistem menjadi sebesar 4,50160 MW dan 2,78984 MVAR. Berikut adalah hasil simulasi setelah dilakukan penambahan kapasitas beban:

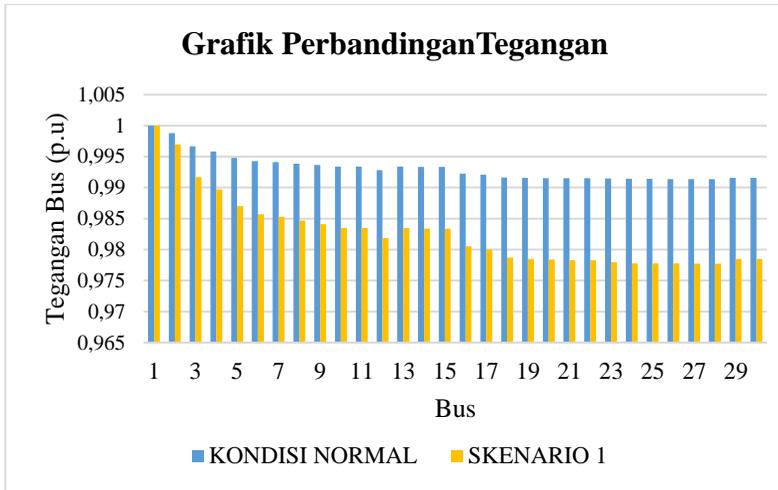
Tabel 4.6 Tegangan dan Faktor Daya pada Skenario 1

Bus	Tegangan (pu)	Faktor Daya
	Metode Network Topology	
1	1	0,8487
2	0,9970	0,8454
3	0,9917	0,8471
4	0,9897	0,8473
5	0,9870	0,8442
6	0,9857	0,8477
7	0,9853	0,8481
8	0,9847	0,8482
9	0,9841	0,8481
10	0,9835	0,8496
11	0,9835	0,8889
12	0,9819	0,8508
13	0,9835	0,8438
14	0,9834	0,8571
15	0,9834	0,8438
16	0,9805	0,8496
17	0,9800	0,8495
18	0,9787	0,8482

Tabel 4.6 Tegangan dan Faktor Daya pada Skenario 1

Bus	Tegangan (pu)	Faktor Daya
	Metode Network Topology	
19	0,9785	0,8506
20	0,9784	0,8491
21	0,9783	0,8500
22	0,9783	0,8500
23	0,9780	0,8495
24	0,9778	0,8442
25	0,9778	0,8525
26	0,9778	0,8542
27	0,9777	0,8438
28	0,9777	0,8750
29	0,9785	0,8750
30	0,9785	0,8750

Pada tabel di atas, adanya penambahan kapasitas beban pada sistem menyebabkan terjadinya penurunan nilai tegangan pada tiap bus. Nilai tegangan terendah pada sistem adalah sebesar 0,9777 p.u. Nilai ini terdapat pada bus 28 dan 27. Tegangan terendah pada simulasi ini masih berada dalam batas aman untuk standar *undervoltage* tegangan. Namun, terjadi penurunan nilai faktor daya pada bus gardu induk sebagai akibat dari peningkatan kapasitas beban.



Gambar 4.1 Tegangan Kondisi Normal dan Skenario 1

Hasil simulasi selanjutnya adalah arus, rugi daya aktif, dan rugi daya reaktif pada sistem:

Tabel 4.7 Arus Saluran, Rugi Daya Aktif dan Reaktif

Bus	Ke Bus	Arus Saluran (A)	Rugi Daya Aktif (kW)	Rugi Daya Reaktif (kVAR)
		Metode Network Topology		
1	2	155,5501	8,921	15,860
2	3	148,6014	15,303	27,221
3	4	139,2866	5,500	9,784
4	5	133,4528	6,844	12,176
5	6	128,7731	3,219	5,726
6	7	125,2589	0,988	1,760
7	8	121,7432	1,401	2,490
8	9	115,8800	1,438	2,558
9	10	111,1863	1,246	2,218
10	11	5,4010	0,003	0,005

Tabel 4.7 Arus Saluran, Rugi Daya Aktif dan Reaktif (Lanjutan)

Bus	Ke Bus	Arus Saluran (A)	Rugi Daya Aktif (kW)	Rugi Daya Reaktif (kVAR)
		Metode Network Topology		
10	12	72,9093	2,177	3,872
10	13	18,7870	0,011	0,020
13	14	16,4388	0,017	0,030
14	15	9,3936	0,003	0,005
12	16	66,5592	1,926	3,426
16	17	60,6705	0,533	0,949
17	18	56,1931	1,425	2,534
18	19	51,4737	0,200	0,356
19	20	15,5796	0,033	0,059
20	21	11,8028	0,009	0,015
21	22	5,9015	0,002	0,004
19	23	27,3975	0,255	0,454
23	24	22,6748	0,087	0,156
24	25	17,9511	0,010	0,018
25	26	14,1720	0,006	0,011
26	27	9,4481	0,003	0,005
27	28	4,7241	0,001	0,001
19	29	4,7203	0,001	0,002
29	30	2,3602	0,000	0,000
Total			51,563	91,716

Pada tabel hasil simulasi dengan penambahan kapasitas beban di atas menunjukkan terjadinya peningkatan arus saluran. Nilai arus terbesar terdapat pada saluran dari bus 1 ke bus 2 dengan nilai sebesar 155,5501 A. Nilai ini masih tergolong aman dengan persentase *loading* saluran sebesar 38,88%. Peningkatan nilai arus juga diikuti dengan meningkatnya rugi daya listrik. Total masing-masing untuk rugi daya aktif dan rugi daya reaktif adalah sebesar 51,563 kW dan 91,716 kVAR.

Pada skenario 1 ini dapat disimpulkan bahwa penambahan kapasitas beban menyebabkan terjadinya penurunan tegangan bus, penurunan nilai faktor daya, peningkatan arus saluran, serta peningkatan rugi daya aktif dan rugi daya reaktif.

4.3 Simulasi dan Analisis pada Skenario 2

Pada skenario 2, dilakukan simulasi terjadinya penambahan kapasitas beban seperti pada simulasi skenario 1. Selain penambahan kapasitas beban juga disimulasikan masuknya daya dari PLTS yang terpasang di titik beban. Daya PLTS yang dikirim oleh pelanggan tersebut diasumsikan sebagai penjualan energi listrik. Pada skenario ini belum terdapat regulasi yang mengatur transaksi jual beli listrik. Dari total keseluruhan beban, dilakukan simulasi dengan keseluruhan konsumen melakukan pembelian energi listrik hingga mencapai 80% pembebanan transformator, dan pelanggan pada juga melakukan penjualan energi listrik dari PLTS yang terpasang.

Panel surya atau PV dimodelkan sebagai *distributed generation* (DG) yang mengkompensasi nilai daya aktif dan daya reaktif dari beban atau sebagai *negative PQ load*. Sehingga daya aktif dan daya reaktif dari beban akan dikompensasi nilainya dari daya yang terbangkit oleh PV. Perhitungan nilai daya terbangkit PLTS yang dijual adalah sebagai berikut:

$$\text{Total Daya PLTS} = \text{Jumlah Pelanggan} \times \text{Daya PLTS} \quad (4.1)$$

Dari data komposisi beban pada Penyulang Badai diketahui bahwa terdapat 7302 pelanggan dengan beban bisnis sebanyak 3651 pelanggan, beban rumah tangga sebanyak 2191 pelanggan, dan beban perkantoran sebanyak 1460 pelanggan. Data ini kemudian dikalikan dengan asumsi daya terbangkit pada PLTS yang mengacu pada referensi [7]. Asumsi untuk beban bisnis adalah sebesar 7.2 kW per pelanggan, beban rumah tangga sebesar 3.6 kW per pelanggan, dan beban perkantoran sebesar 7.2 kW per pelanggan. Sehingga didapat:

1. Beban bisnis

$$\begin{aligned} \text{Total Daya PLTS} &= 3651 \times 7,2 \text{ kW} \\ &= 26,2872 \text{ MW} \end{aligned}$$

2. Beban rumah tangga

$$\begin{aligned} \text{Total Daya PLTS} &= 2191 \times 7,2 \text{ kW} \\ &= 7,8876 \text{ MW} \end{aligned}$$

3. Beban perkantoran

$$\begin{aligned} \text{Total Daya PLTS} &= 1460 \times 7,2 \text{ kW} \\ &= 10,5120 \text{ MW} \end{aligned}$$

Dari perhitungan tersebut, didapatkan total maksimum kapasitas daya PLTS pada Penyulang Badai adalah sebesar 44,6868 MW. Namun, terdapat batas maksimal daya PLTS yang masuk ke sistem, yakni sebesar total kapasitas bebannya. Sehingga total daya dari PLTS adalah sebesar 6,62 MW. Nilai tersebut kemudian dibagi dengan 29 titik beban. Titik beban tersebut yakni bus B.9, B.4, B.347, B.94, B.288, B.417, B.71, B.160, B.205, B.63, B.40, B.238, B.70, B.348, B.56, B.246, B.53, B.323, B.13, B.363, B.79, B.396, B.69, B.145, B.400, B.418, B.150, B.255, dan B.217. Sehingga, masing-masing titik beban melakukan transfer daya PLTS ke sistem sebesar 0,2282 MW. Sedangkan untuk total beban sistem adalah sebesar 4,50160 MW dan 2,78984 MVAR. Nilai ini selanjutnya akan digunakan dalam simulasi skenario 2.

Hasil simulasi skenario 2 ditampilkan pada tabel berikut ini:

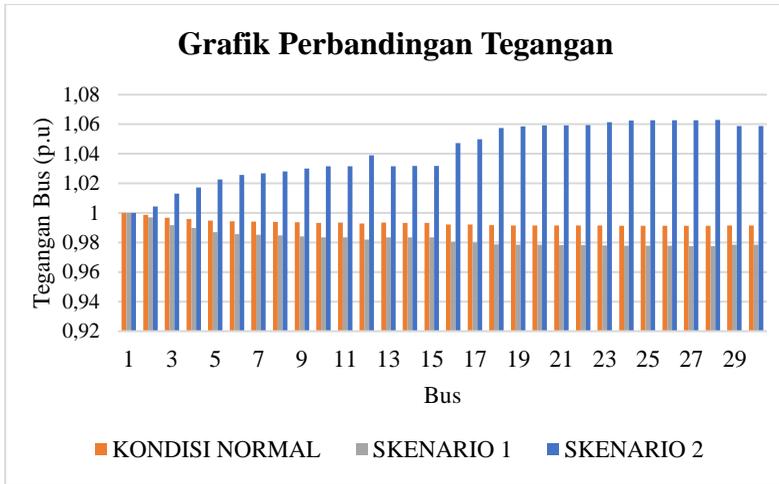
Tabel 4.8 Tegangan dan Faktor Daya pada Skenario 2

Bus	Tegangan (pu)	Faktor Daya
	Metode Network Topology	
1	1,0000000	-0,8502
2	1,0010000	-0,8543
3	1,0040000	-0,8531
4	1,0050000	-0,8520
5	1,0060000	-0,8484
6	1,0070000	-0,8498
7	1,0070000	-0,8532
8	1,0080000	-0,8522
9	1,0080000	-0,8477
10	1,0080000	-0,8495
11	1,0080000	-0,8750
12	1,0090000	-0,8516

Tabel 4.8 Tegangan dan Faktor Daya pada Skenario 2 (Lanjutan)

Bus	Tegangan (p.u)	Faktor Daya
	Metode Network Topology	
13	1,0080000	-0,8235
14	1,0080000	1,0000
15	1,0080000	0,8000
16	1,0100000	-0,8531
17	1,0110000	-0,8529
18	1,0120000	-0,8491
19	1,0120000	-0,8514
20	1,0120000	-0,8571
21	1,0120000	-0,8571
22	1,0120000	-0,8571
23	1,0120000	-0,8529
24	1,0130000	-0,8596
25	1,0130000	-0,8511
26	1,0130000	-0,8485
27	1,0130000	-0,8182
28	1,0130000	-0,8182
29	1,0120000	-0,8421
30	1,0120000	-0,8421

Pada tabel diatas, terlihat bahwa akibat tidak adanya regulasi yang mengatur transaksi jual beli listrik menyebabkan daya terbangkit PLTS yang ditransfer ke sistem terlalu banyak. Sehingga, terjadi peningkatan tegangan dimana nilai tegangan tertinggi pada sistem mencapai 1,013 p.u. Nilai ini terdapat pada tegangan bus 28. Nilai tegangan tersebut masih dalam batas standar untuk *overvoltage*, yakni sebesar 1,05 p.u sesuai SPLN 1:1995.



Gambar 4.2 Tegangan Kondisi Normal, Skenario 1, dan Skenario 2

Faktor daya juga bernilai negatif sebagai akibat terlalu banyak suplai daya pada sistem dan terdapat perubahan arah aliran daya dari sisi beban menuju sisi beban bagian atas atau bus gardu induk. Aliran daya keatas menuju grid menimbulkan perubahan arah aliran daya pada Penyulang Badai yang disebut dengan fenomena *reverse power flow*. Hal ini dapat dilihat pada tabel aliran daya aktif dan daya reaktif berikut:

Tabel 4.9 Aliran Daya Aktif dan Reaktif pada Skenario 2

Bus	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)
	Metode Network Topology	
1	-2,10	-1,29
2	-2,11	-1,29
3	-2,09	-1,28
4	-2,13	-1,31
5	-2,07	-1,28
6	-1,98	-1,22
7	-1,86	-1,14
8	-1,73	-1,07

Tabel 4.9 Aliran Daya Aktif dan Reaktif pada Skenario 2 (Lanjutan)

Bus	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)
	Metode Network Topology	
9	-1,67	-1,03
10	-1,58	-0,97
11	-0,07	-0,04
12	-1,55	-0,96
13	-0,14	-0,09
14	0,02	0,01
15	0,04	0,03
16	-1,51	-0,93
17	-1,45	-0,90
18	-1,35	-0,84
19	-1,26	-0,78
20	-0,24	-0,15
21	-0,12	-0,07
22	-0,06	-0,04
23	-0,58	-0,36
24	-0,49	-0,30
25	-0,40	-0,25
26	-0,28	-0,17
27	-0,18	-0,11
28	-0,09	-0,06
29	-0,32	-0,20
30	-0,16	-0,10

Aliran daya bernilai negatif karena PLTS menyuplai daya listrik ke sistem. Akibatnya, penjualan yang lebih besar dari pembelian menyebabkan tengkulak energi mengalami kerugian secara ekonomi.

Hasil simulasi arus saluran, rugi daya aktif dan reaktif ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 4.10 Arus Saluran, Rugi Daya Aktif dan Reaktif

Bus	Ke Bus	Arus Saluran (A)	Rugi Daya Aktif (kW)	Rugi Daya Reaktif (kVAR)
		Metode Network Topology		
1	2	71,20	1,91	3,35
2	3	70,38	3,51	6,15
3	4	71,85	1,49	2,62
4	5	69,88	1,92	3,36
5	6	66,77	0,88	1,55
6	7	62,51	0,25	0,44
7	8	58,25	0,33	0,57
8	9	56,29	0,35	0,61
9	10	53,18	0,29	0,51
10	11	2,42	0,00	0,00
10	12	52,06	1,14	1,99
10	13	4,74	0,00	0,00
13	14	0,65	0,00	0,00
14	15	1,47	0,00	0,00
12	16	50,56	1,14	1,99
16	17	48,60	0,35	0,61
17	18	45,27	0,95	1,66
18	19	42,17	0,14	0,24
19	20	7,92	0,01	0,02
20	21	3,91	0,00	0,00
21	22	1,96	0,00	0,00
19	23	19,49	0,13	0,23
23	24	16,39	0,05	0,08
24	25	13,29	0,01	0,01
25	26	9,29	0,00	0,00
26	27	6,19	0,00	0,00
27	28	3,10	0,00	0,00

Tabel 4.10 Arus Saluran, Rugi Daya Aktif dan Reaktif (Lanjutan)

Bus	Ke Bus	Arus Saluran (A)	Rugi Daya Aktif (kW)	Rugi Daya Reaktif (kVAR)
		Metode Network Topology		
19	29	10,76	0,01	0,01
29	30	5,38	0,00	0,00
Total			14,84	26,03

Pada tabel di atas, terjadi penurunan nilai arus saluran yang cukup signifikan. Arus saluran terbesar pada simulasi skenario 2 ini adalah 71,20 A atau sebesar 17,8% *loading* salurannya. Nilai ini di dalam batas maksimal dari Kapasitas Hantar Arus (KHA). Nilai arus saluran yang kecil berakibat pada rugi daya sistem yang juga menurun. Dibandingkan pada simulasi skenario 1, nilai rugi daya pada simulasi skenario 2 nilainya jauh lebih kecil. Total rugi daya aktif sebesar 14,84 kW dan total rugi daya reaktif sebesar 26,03 kVAR. Nilai faktor daya menjadi negatif sebagai akibat terlalu banyak daya listrik yang ditransfer ke jaringan distribusi.

Pada skenario 2, transaksi jual beli listrik juga merugikan tengkulak atau *energy retailer* dari sisi ekonomi. Penjualan energi listrik yang melebihi pembelian energi akan mengakibatkan kerugian pada tengkulak. Tengkulak akan membeli energi listrik dari pelanggan terlalu besar, sedangkan energi listrik yang dibeli oleh pelanggan terlalu kecil nilainya. Secara matematis:

$$kWh \text{ jual} \times \text{tarif jual} \geq kWh \text{ beli} \times \text{tarif beli} \quad (4.2)$$

Pada skenario 2, terjadi transaksi penjualan energi listrik oleh pelanggan sebesar 0,2282 MW pada tiap titik beban dari bus 2 hingga bus 30. Sedangkan apabila melihat kapasitas beban terpasang pada bus tersebut, nilai terbesar hanya sebesar 0,408 MW, beban lainnya bernilai lebih kecil. Artinya, kapasitas penjualan energi listrik melebihi kapasitas pembeliannya. Hal ini akan menyebabkan tengkulak mengalami kerugian secara ekonomi.

Apabila pembelian energi listrik pada skenario 2 hanya 4,5016 MW dan penjualan energi listrik oleh pelanggan adalah sebesar 6,62 MW, dengan asumsi harga penjualan dan pembelian energi listrik adalah sama, maka tengkulak mengalami kerugian sebesar 32%.

$$\begin{aligned}
 \text{Kerugian} &= \frac{(\text{kWh beli} \times \text{harga beli} - \text{kWh jual} \times \text{harga jual})}{\text{kWh beli} \times \text{harga beli}} \times 100\% \quad (4.3) \\
 &= \frac{6,62 - 4,5016}{6,62} \times 100\% \\
 &= 32,6\%
 \end{aligned}$$

Sehingga, dari simulasi pada skenario 1 dan 2 diperlukan regulasi untuk mengatur proses transaksi jual beli energi listrik. Hal ini bertujuan agar sistem berada dalam kondisi aman ketika beroperasi.

4.4 Simulasi dan Analisis pada Skenario 3

Pada skenario 3, sudah diterapkan regulasi yang mengatur proses jual beli listrik dari *prosumer* ke tengkulak atau *electricity retailer*. Regulasi yang diterapkan adalah sebagai berikut:

- Penjualan Energi Listrik:
 1. Proses penjualan energi listrik dilakukan dengan mengajukan permohonan pada tengkulak atau penyedia jasa kelistrikan maksimal satu hari sebelum hari H atau maksimal H-1.
 2. Daya listrik yang diperbolehkan untuk dijual adalah sebesar 100% dari kapasitas daya listrik langganan.
 3. Transfer daya listrik dapat dilakukan dengan kondisi arus pada saluran dsitribusi tidak melebihi batas maksimal KHA sebesar 400 A.
 4. Pelanggan yang melakukan proses penjualan listrik dari PV diwajibkan melengkapi perangkat PV dengan inverter, sistem pengaman, dan sambungan listrik.

- Pembelian Energi Listrik:
 1. Proses pembelian energi listrik dilakukan dengan mengajukan permohonan pada penyedia jasa kelistrikan maksimal satu hari sebelum hari H atau maksimal H-1.
 2. Pembelian energi listrik yang dapat dilakukan dengan catatan tidak melebihi pembebanan pada transformator distribusi sebesar 80% dari kapasitas transformator.
 3. Transfer daya listrik dapat dilakukan dengan kondisi arus pada saluran distribusi tidak melebihi batas maksimal KHA sebesar 400 A.

Pada skenario 3 simulasi sama seperti pada skenario 2 namun regulasi sudah diterapkan. Diasumsikan 50% pelanggan melakukan transaksi pembelian energi listrik dan 50% sisanya melakukan penjualan energi listrik. Simulasi pembelian energi listrik dilakukan dengan penambahan kapasitas beban hingga mencapai 80% dari kapasitas transformator distribusi. Sedangkan simulasi untuk penjualan energi listrik adalah dengan memasukkan PLTS pada sistem sebesar 100% dari kapasitas langganan atau sama dengan kapasitas beban terpasang.

$$Total\ daya\ PLTS = Total\ daya\ beban \quad (4.2)$$

Hasil simulasi setelah diterapkan regulasi yang mengatur transaksi jual beli listrik adalah sebagai berikut:

Tabel 4.11 Tegangan dan Faktor Daya pada Skenario 3

Bus	Tegangan (p.u)	Faktor Daya
	Metode Network Topology	
1	1,0000000	0,8520
2	0,9984952	0,8498
3	0,9959157	0,8474
4	0,9949966	0,8519
5	0,9938661	0,8467
6	0,9933418	0,8500
7	0,9931829	0,8512

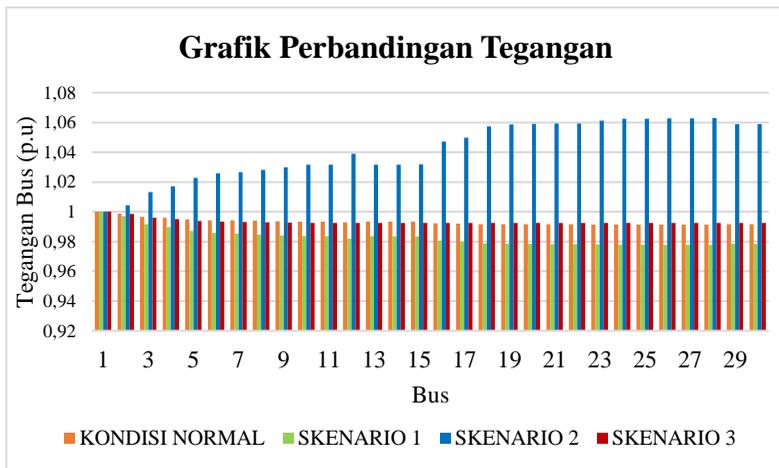
Tabel 4.11 Tegangan dan Faktor Daya pada Skenario 3 (Lanjutan)

Bus	Tegangan (p.u)	Faktor Daya
	Metode Network Topology	
8	0,9929617	0,8526
9	0,9927432	0,8529
10	0,9925616	0,8500
11	0,9925355	0,8889
12	0,9924289	0,8182
13	0,9925465	0,8438
14	0,9925238	0,8333
15	0,9925238	-
16	0,9924289	-
17	0,9924289	-
18	0,9924289	-
19	0,9924289	-
20	0,9924289	-
21	0,9924289	-
22	0,9924289	-
23	0,9924289	-
24	0,9924289	-
25	0,9924289	-
26	0,9924289	-
27	0,9924289	-
28	0,9924289	-
29	0,9924289	-
30	0,9924289	-

Pada tabel diatas terlihat bahwa terjadi drop tegangan pada sistem akibat adanya proses transaksi jual beli listrik, namun *drop* tegangan tidak sampai pada kondisi *undervoltage*. Nilai tegangan terendah hasil simulasi skenario 3 adalah sebesar 0,9924289 p.u. Nilai ini terdapat pada bus 12, dan bus 16 hingga bus 30. Nilai tersebut lebih baik hasilnya apabila

dibandingkan dengan simulasi pada skenario 1 maupun skenario 2. Tegangan sistem juga tidak mengalami *overvoltage* sebagai akibat penetrasi dari panel surya atau PLTS. Nilai tegangan terbesar adalah pada bus sumber atau bus gardu induk yang nilainya sebesar 1 p.u. Hal ini terjadi karena adanya regulasi yang membatasi kapasitas transaksi jual beli listrik pada sistem.

Nilai faktor daya pada bus gardu induk adalah sebesar 0,8520. Nilai ini sudah sesuai dengan standar untuk minimum factor daya. Pada bus 15 hingga bus 30 tidak terdapat nilai factor daya pada bus karena beban pada bus tersebut disuplai langsung oleh PLTS.



Gambar 4.3 Tegangan Kondisi Normal, Skenario 1, Skenario 2, dan Skenario 3

Tabel selanjutnya menunjukkan aliran daya aktif dan daya reaktif pada simulasi skenario 3. Berikut adalah hasilnya:

Tabel 4.12 Aliran Daya Aktif dan Reaktif pada Skenario 3

Bus	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)
	Metode Network Topology	
1	1,45	2,74
2	1,45	2,73

Tabel 4.12 Aliran Daya Aktif dan Reaktif pada Skenario 3 (Lanjutan)

Bus	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)
	Metode Network Topology	
3	1,31	2,49
4	1,14	2,16
5	1,03	1,96
6	0,95	1,8
7	0,89	1,68
8	0,82	1,56
9	0,72	1,36
10	0,63	1,2
11	0,1	0,18
12	0,11	0,22
13	0,17	0,32
14	0,13	0,24
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0
25	0	0
26	0	0
27	0	0
28	0	0
29	0	0
30	0	0

Pada tabel diatas tidak ditemukan bus yang mengalami fenomena *reverse power flow*. Aliran daya berasal dari bus gardu induk ke titik-titik beban. Pada bus 15 hingga bus 30 tidak terdapat nilai aliran daya karena beban disuplai sepenuhnya oleh PLTS yang tersambung pada titik tersebut.

Tabel selanjutnya adalah nilai arus saluran dan rugi daya listrik pada simulasi skenario 3. Berikut adalah hasilnya:

Tabel 4.13 Arus Saluran, Rugi Daya Aktif dan Reaktif

Bus	Ke Bus	Arus Saluran (A)	Rugi Daya Aktif (kW)	Rugi Daya Reaktif (kVAR)
		Metode Network Topology		
1	2	79,0084	2,302	4,092
2	3	72,0697	3,599	6,403
3	4	62,7942	1,118	1,989
4	5	56,9916	1,248	2,221
5	6	52,3443	0,532	0,946
6	7	48,8570	0,150	0,268
7	8	45,3692	0,195	0,346
8	9	39,5547	0,168	0,298
9	10	34,9021	0,123	0,219
10	11	5,3516	0,003	0,005
10	12	6,2830	0,016	0,029
10	13	9,3071	0,003	0,005
13	14	6,9804	0,003	0,005
14	15	0.0000	0.000	0.000
12	16	0.0000	0.000	0.000
16	17	0.0000	0.000	0.000
17	18	0.0000	0.000	0.000
18	19	0.0000	0.000	0.000
19	20	0.0000	0.000	0.000
20	21	0.0000	0.000	0.000

Tabel 4.13 Arus Saluran, Rugi Daya Aktif dan Reaktif (Lanjutan)

Bus	Ke Bus	Arus Saluran (A)	Rugi Daya Aktif (kW)	Rugi Daya Reaktif (kVAR)
		Metode Network Topology		
21	22	0.0000	0.000	0.000
19	23	0.0000	0.000	0.000
23	24	0.0000	0.000	0.000
24	25	0.0000	0.000	0.000
25	26	0.0000	0.000	0.000
26	27	0.0000	0.000	0.000
27	28	0.0000	0.000	0.000
19	29	0.0000	0.000	0.000
29	30	0.0000	0.000	0.000
Total			9,460	16,826

Apabila dibandingkan dengan simulasi skenario 1 dan skenario 2, arus saluran pada skenario 3 lebih rendah nilainya, dimana arus terbesar terdapat pada saluran antara bus 1 ke bus 2 yang nilainya adalah 79,0084 A. Persentase maksimum *loading* saluran pada simulasi ini adalah 18,59%. Pada bus 15 hingga bus 30 tidak terdapat aliran arus dari sistem atau arus bernilai 0 karena pada kondisi tersebut beban disuplai daya oleh PLTS, sehingga sistem tidak menyuplai daya ke titik beban tersebut. Nilai pembebanan transformator berada pada nilai 80% dari kapasitasnya. Nilai tersebut berada dalam batas aman untuk standar pembebanan transformator.

Regulasi untuk transaksi jual beli listrik yang diterapkan pada skenario 3 mampu menekan nilai rugi daya aktif dan rugi daya reaktif dibandingkan ketika tidak ada regulasi yang mengatur proses jual beli. Total rugi daya aktif pada sistem adalah sebesar 9,46 kW dan total rugi daya reaktif adalah sebesar 16,82 kVAR. Tengkulak juga tidak mengalami kerugian secara ekonomi. Karena, kapasitas penjualan energi listrik oleh pelanggan dibatasi jumlahnya.

$$kWh \text{ jual} \times \text{tarif jual} \leq kWh \text{ beli} \times \text{tarif beli} \quad (4.2)$$

Secara ekonomi tengkulak masih untung karena kapasitas pembelian energi listrik masih lebih besar dibandingkan dengan penjualan energi listrik oleh pelanggan. Keuntungan minimum adalah 0% apabila terjadi penjualan energi listrik yang jumlahnya sama dengan pembelian energi listrik.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada pelaksanaan tugas akhir ini didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Program aliran daya dengan metode *Network Topology* dapat digunakan dalam analisa aliran daya pada jaringan distribusi radial.
- b. Penyulang Badai pada kondisi normal berada pada kondisi aman untuk parameter tegangan dengan nilai tegangan terendah sebesar 0,9913919 p.u, arus saluran terbesar bernilai 61,64 A, faktor daya pada bus gardu induk sebesar 0,85326, dan total rugi daya aktif sebesar 8,0340 kW serta rugi daya reaktif sebesar 14,317.
- c. Adanya transaksi jual beli listrik tanpa penerapan regulasi menyebabkan sistem mengalami kenaikan tegangan dimana tegangan terbesar adalah 1,013 p.u pada bus 27 dan 28 dan loading saluran sebesar 17,8% pada saluran dari bus 1 ke bus 2.
- d. Secara ekonomi, adanya transaksi jual beli listrik tanpa penerapan regulasi juga menyebabkan tengkulak merugi sebesar 32% akibat kapasitas penjualan energi listrik yang lebih besar dari pembeliannya.
- e. Diperlukan regulasi untuk mengatur transaksi jual beli listrik pada sistem, seperti batas maksimal penjualan energi listrik sebesar 100% dari kapasitas daya listrik langganan dan batas maksimal pembelian energi listrik adalah hingga 80% kapasitas transformator distribusi.
- f. Adanya regulasi dalam transaksi jual beli energi listrik menghasilkan tegangan tertinggi sebesar 1 p.u, tegangan terendah sebesar 0,9924289 p.u, dan persentase maksimum *loading* saluran sebesar 18,59%.
- g. Secara ekonomi, kerugian pada tengkulak dapat dihindari dengan menerapkan regulasi pada transaksi jual beli listrik, yakni maksimal kapasitas penjualan energi listrik adalah sama dengan pembelian energi listriknya.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil analisis untuk pengembangan penelitian ini adalah:

- a. Perlu dilakukan analisi penggunaan *blockchain* dalam transaksi

jual beli energi listrik.

- b. Analisa aliran daya dengan pengaruh sumber PLTS dan beban dapat dikembangkan lagi dengan mempertimbangkan parameter kualitas daya listrik seperti harmonisa, nilai hubung singkat sistem, dan kestabilan frekuensi.
- c. Analisa aliran daya juga dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan analisis ekonomi lainnya yang mendorong terjadinya transaksi jual beli energi listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Asmelash and G. Prakash, "Future of Solar Photovoltaic: Deployment, Investment, Technology, Grid Integration and Socio-Economic Aspects," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.
- [2] R. Henriquez-Auba, P. Pauli, D. Kalathil, D. S. Callaway and K. Poolla, "The Sharing Economy for Residential Solar Generation," in *2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Miami Beach, FL, USA, 2018.
- [3] S. Teleke, F. Jahanbakhsh, F. Katiraei and J. R. Aguero, "Analysis of Interconnection of Photovoltaic Distributed Generation," in *2011 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Orlando, FL, USA, 2011.
- [4] P. Chaudhary and M. Rizwan, "Voltage regulation mitigation techniques in distribution system with high PV penetration : A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3279-3287, 2018.
- [5] P. Celvakumaran, V. K. Ramachandaramurthy and S. Padmanaban, "Technical Constraints of Integrating Net Energy Metering from The Malaysian Perspective," in *2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Kota Kinabalu, Malaysia, 2018.
- [6] G. Matkar, D. K. Dheer, A. S. Vijay and S. Doolla, "A Simple Mathematical Approach to Asses the Impact of Solar PV Penetration on Voltage Profile of Distribution Network," in *National Power Electronics Conference*, Pune, India, 2017.
- [7] S. Yoomak, T. Patcharoen and A. Ngaopitakkul, "Performance and Economic Evaluation of Solar Rooftop Systems in Different Regions of Thailand," *Sustainability*, vol. 11, pp. 1-20, 25 November 2019.
- [8] K. William H., *Distribution System Modeling and Analysis*, CRC Press, 2012.
- [9] H. Saadat, *Power System Analysis*, McGraw-Hill Company, 1998.
- [10] A. R. Abul`Wafa, "A network-topology-based load flow for radial distribution network with composite and exponential load," *Electric*

Power System Research, vol. 91, pp. 37-43, 2012.

- [11] D. Ravi, V. U. Reddy and D. P. Reddy, "Load Flow Analysis for Unbalanced Radial Distribution Systems," *International Journal of Electrical Electronics & Computer Science Engineering (IJECCSE)*, vol. 5, no. 1, pp. 18-23, February 2018.
- [12] Soedibyo, *Pembangkitan Tenaga Listrik*, ITS Press, 2015.
- [13] R. A. Messenger and J. Ventre, *Photovoltaic System Engineering*, New York: CRC Press, 2004.
- [14] B. Singh and J. Sharma, "A review on distributed generation planning," *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier*, vol. 76, pp. 529-544, 2017.
- [15] R. A. Shayani and M. A. G. de Oliveira, "Photovoltaic Generation Penetration Limits in Radial Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power System*, vol. 26, pp. 1625-1631, 2011.
- [16] M. N. Faqiry and S. Das, "Double Auction With Hidden User Information: Application to Energy Transaction in Microgrid," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 49, no. 11, pp. 2326-2339, February 2018.
- [17] C. O. Adika and L. Wang, "Energy Management for a Customer Owned GridTied Photovoltaic Micro," in *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Vancouver, BC, Canada, 2013.
- [18] "Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 49 Tahun 2018," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta, 2018.
- [19] W. Warutai, P. S. W. Thongrod and C. Charoenlarnnoppaart, "Optimal Energy Transaction Ledger Model for Microgrid Energy Trading," in *IEEE 3rd International Conference on Circuits, Systems and Devices (ICCS&D)*, Chengdu, China, China, 2019.
- [20] "Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset," PT. PLN (Persero), Jakarta, 2014.
- [21] K. Najdenkoski, G. Rafajlovski and V. Dimcev, "Thermal Aging of Distribution Transformers According to IEEE and IEC Standards," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, FL, USA, 2007.
- [22] N. Duraisamy and A. Ukil, "Cable Ampacity Calculation and Analysis for Power Flow Optimization," in *Asian Conference on*

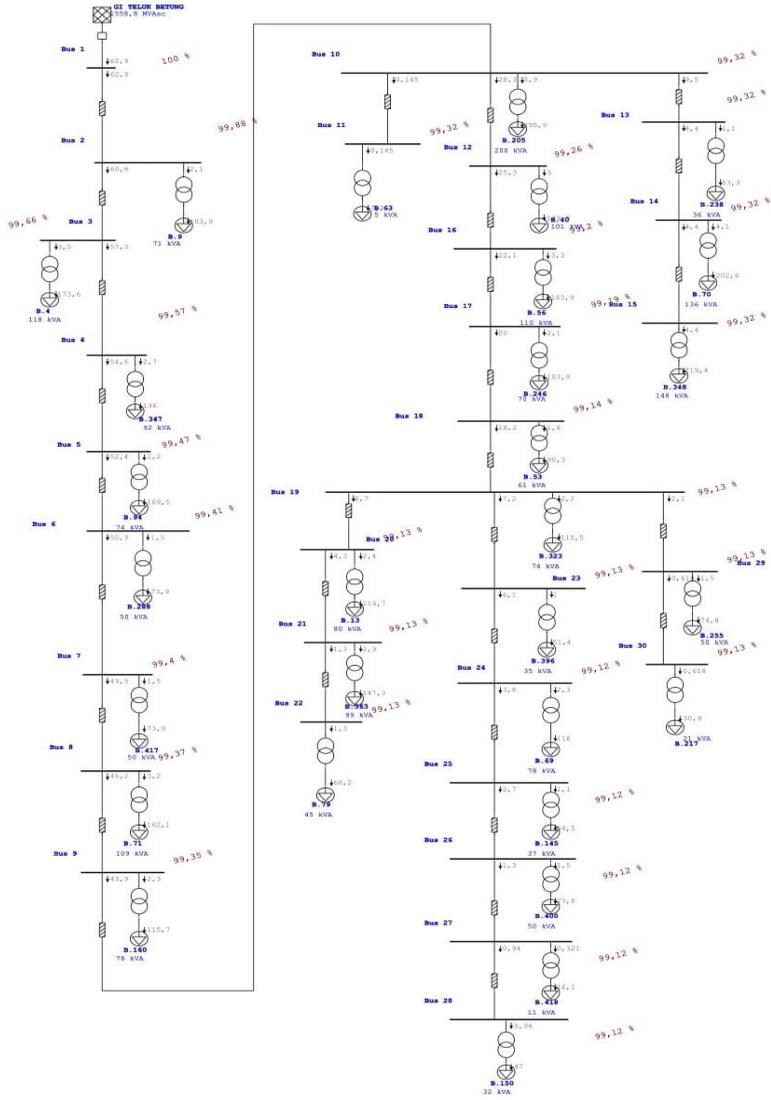
Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT), Singapore, 2016.

- [23] SPLN 64:1985 Petunjuk Pemilihan dan Penggunaan Pelebur pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah, Jakarta: PT. PLN (Persero), 1985.
- [24] SPLN 70-1 : 1985 PEMBAKUAN ISTILAH TEKNIK BIDANG KELISTRIKAN, PT. PLN (Persero), 1985.
- [25] SPLN 1:1995 Tegangan-Tegangan Standar, Jakarta: PT. PLN (Persero), 1995.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Single Line Diagram Penyulang Badai pada ETAP 16.0.0



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIOGRAFI PENULIS



Ahmad Bariq Al Fahri, lahir di Kabupaten Ponorogo, Provinsi Jawa Timur pada tanggal 19 September 1997. Anak kedua dari tiga bersaudara. Selama kuliah penulis pernah aktif pada kegiatan organisasi di BEM ITS, IEEE ITS Student Chapter, dan PEMANDU FTE-TS. Penulis juga aktif terlibat sebagai panitia dalam kegiatan mahasiswa pada skala departemen hingga institute. Saat ini penulis aktif sebagai asisten Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik (PSSL), Departemen Teknik Elektro,

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas ITS. Semasa menjadi asisten PSSL, penulis terlibat dalam beberapa kegiatan seperti kompetisi nasional & internasional, penelitian, training industri & mahasiswa, pengabdian masyarakat, dan proyek kerjasama dengan PLN, dsb. Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu:

1. SDN 1 Bangunsari (2004-2010)
2. SMPN 1 Ponorogo (2010-2013)
3. SMAN 1 Ponorogo (2013-2016)

Pada tahun 2016, penulis melanjutkan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dengan jurusan Teknik Elektro. Bidang studi yang penulis ambil adalah Teknik Sistem Tenaga.

Penulis dapat dihubungi pada email: bariqalfahri@gmail.com