

**ANALISA DAMPAK MASUKNYA *PHOTOVOLTAIC (PV)* DALAM SKALA
BESAR TERHADAP PERFORMA SISTEM TENAGA LISTRIK**

(Tesis)



Oleh

UBAIDAH

**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2021**

**ANALISA DAMPAK MASUKNYA *PHOTOVOLTAIC (PV)* DALAM SKALA
BESAR TERHADAP PERFORMA SISTEM TENAGA LISTRIK**

**Oleh
UBAIDAH**

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK ELEKTRO**

Pada

**Program Pascasarjana Magister Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2021**

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE IMPACT OF HIGH PENETRATION PHOTOVOLTAIC (PV) INCLUSION ON ELECTRICITY SYSTEM PERFORMANCE

By

UBAIDAH

Photovoltaic (PV) is a renewable energy generator that produces electrical energy at a certain time or also called intermittent. A large number of PV penetrations into the system significantly affects the ability of conventional generators to catch up with power due to decreased PV output power or when PV output power is not available. This is due to the different characteristics of the lean rate of each type of generator. To overcome the power imbalance in the electric power system with various compositions, it is necessary to limit the number of PV that is allowed to be installed in the electrical power interconnection system.

In this study, the generator and load data were used collectively from the Indonesian National Great Company. The power plants used are hydropower plant, steam power plant, geothermal power plant, diesel power plant, gas engine power plant, and gas power plant. Based on the simulation results, the number of PV that is allowed to be installed is a maximum of 30% of the total generation in a certain generation configuration. If the amount of PV exceeds the maximum limit, there will be a power imbalance between the generator and the load. If the generator configuration has a large generator capacity and has a high lean rate, PV plants can be connected to the electrical power interconnection of more than 30% of the total generation.

Keywords: Duck curve, photovoltaic, ramping rate, power imbalance.

ABSTRAK

ANALISA DAMPAK MASUKNYA *PHOTOVOLTAIC (PV)* DALAM SKALA BESAR TERHADAP PERFORMA SISTEM TENAGA LISTRIK

Oleh

UBAIDAH

Photovoltaic (PV) merupakan salah satu pembangkit *renewable energy* yang sifatnya *intermittent* dimana ketersediaannya tidak selalu ada ketika diperlukan. Banyaknya jumlah PV yang masuk ke sistem tenaga listrik sangat berpengaruh terhadap kemampuan generator konvensional dalam mengejar ketertinggalan daya akibat menurunnya daya *output* PV atau pada saat daya *output* PV tidak tersedia. Hal ini disebabkan oleh karakteristik *ramping rate* setiap jenis generator berbeda-beda. Untuk mengatasi ketertinggalan daya pada sistem tenaga listrik, maka perlu membatasi banyaknya PV yang diperbolehkan terpasang pada sistem interkoneksi tenaga listrik.

Pada penelitian ini, data pembangkit dan beban yang digunakan berdasarkan data kelistrikan Lampung. Pembangkit yang digunakan adalah PLTA, PLTU, PLTP, PLTD, PLTMG dan PLTG. Berdasarkan hasil simulasi, banyaknya PV yang diperbolehkan terpasang maksimal 30% dari total pembangkitan pada konfigurasi pembangkitan tertentu. Apabila jumlah PV melebihi batas maksimal tersebut, maka akan terjadi ketidaksetimbangan daya antara pembangkit dan beban. Jika konfigurasi pembangkit dengan kapasitas generator besar dan memiliki *ramping rate* tinggi memungkinkan pembangkit PV yang terpasang ke interkoneksi tenaga listrik lebih dari 30% dari total pembangkitan.

Kata Kunci: *Duck curve*, *photovoltaic*, *ramping rate*, ketidaksetimbangan daya.

Judul Tesis

: **ANALISA DAMPAK MASUKNYA
PHOTOVOLTAIC (PV) DALAM SKALA
BESAR TERHADAP PERFORMA
SISTEM TENAGA LISTRIK**

Nama Mahasiswa

: **Ubaidah**

Nomor Pokok Mahasiswa

: 1925031006

Program Studi

: Magister Teknik Elektro

Fakultas

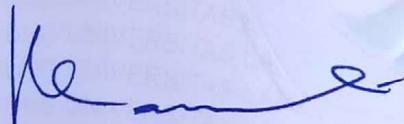
: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

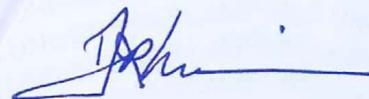
Pembimbing I

Pembimbing II



Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D.Eng.

NIP 19700719 200012 1 001



**Dr. Eng. Ir. Dikpride Despa, S.T.,
M.T., IPM., ASEAN Eng.**

NIP 19720428 199803 2 001

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro



Misfa Susanto, S.T., M.T., Ph.D.

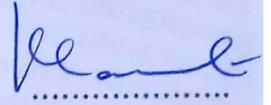
NIP 19710525 199903 1 001

MENGESAHKAN

1. Komisi Penguji

Ketua Komisi Penguji
(Pembimbing I)

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



Sekretaris Komisi Penguji
(Pembimbing II)

: **Dr. Eng. Ir. Dikpride Despa, S.T.,
M.T., IPM., ASEAN Eng.**



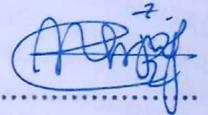
Anggota Komisi Penguji
(Penguji I)

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



Anggota Komisi Penguji
(Penguji II)

: **Dr. Eng. Charles R. Harahap, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN Eng.
NIP 19620717 198703 1 002

3. Direktur Program Pascasarjana



Prof. Dr. Ir. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T.
NIP 19710415 199803 1 005

Tanggal Lulus Ujian Tesis : **11 Oktober 2021**

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini Saya menyatakan bahwa sesungguhnya tesis yang saya susun sebagai syarat untuk mendapatkan gelar Magister Teknik pada Program Pascasarjana Magister Teknik Elektro seluruhnya adalah benar merupakan hasil karya sendiri.

Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan tesis ini, saya kutip dari hasil penulisan orang lain yang sumbernya dituliskan dengan jelas sesuai dengan norma, kaidah dan etika penulisan karya ilmiah.

Tesis dengan judul “Analisa Dampak Masuknya *Photovoltaic (PV)* dalam Skala Besar Terhadap Performa Sistem Tenaga Listrik ” dapat diselesaikan berkat bimbingan dan motivasi dari pembimbing-pembimbing saya, yaitu:

1. Khairudin, S.T., M.Sc.,Ph.D.Eng.
2. Dr. Eng. Dikpride Despa, S.T., M.T.,IPM.ASEAN.Eng

Saya ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak, khususnya kedua dosen pembimbing dan Bapak/ Ibu Dosen Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan, bimbingan dan motivasi.

Apabila dikemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian tesis yang saya buat ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiat dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku.

Bandar Lampung, 22 November 2021



Ubaidah

NPM: 1925031006

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Desa Mataram Kecamatan Gadingrejo Kabupaten Pringsewu pada tanggal 22 November 1995, sebagai anak ketiga dari empat bersaudara dari pasangan Bapak Sahono dan Ibu Sumiati. Penulis memiliki satu saudara perempuan bernama Untari dan dua saudara laki-laki bernama Suryanto dan Ahmad Mulyadi.

Penulis memulai pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 2 Mataram pada tahun 2001-2007, Sekolah Menengah Pertama ditempuh di SMP Negeri 3 Gadingrejo pada tahun 2007-2010, melanjutkan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Gadingrejo, pada tahun 2010-2013.

Tahun 2013, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) pada tahun 2015-2016. Penulis juga telah melaksanakan kerja praktik (KP) di PT. Pertamina Geothermal Energy, Ulubelu–Tanggamus.

Pada Tahun 2019 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Program Pascasarjana Teknik Elektro Universitas Lampung. Selain menjadi Mahasiswa, penulis bekerja sebagai

Tenaga Pengajar di Universitas Aisyah Pringsewu (UAP) Jurusan Teknik Informatika Prodi Teknik Elektronika terhitung sejak tahun 2019. Selain itu penulis juga bekerja sebagai tenaga pengajar di SMKS Swadhipa 2 Natar sebagai guru produktif Teknik Instalasi Tenaga Listrik. Pada tahun 2020 penulis melakukan penelitian pada bidang sistem tenaga listrik dengan judul tesis “Analisa Dampak Masuknya *Photovoltaic (PV)* dalam Skala Besar Terhadap Performa Sistem Tenaga Listrik” dibawah bimbingan Bapak Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D. Eng . dan Ibu Dr. Eng. Ir. Dikpride Despa, S.T., M.T., IPM ASEAN. Eng.

Bandar Lampung, 22 November 2021
Penulis



UBAIDAH



PERSEMBAHAN

Dengan *Ridho* Allah SWT, teriring *shalawat* kepada Nabi Muhammad SAW

Karya tulis ini kupersembahkan untuk:

“Keluargaku Tercinta”

Dosen Teknik Elektro

Yang selalu membimbing, mengajarkan, memberikan saran, baik secara akademis maupun non akademis

Teman- teman kebanggaanku

Rekan – rekan Jurusan Teknik Elektro

Sahabat-sahabatku

Yang selalu membantu, memberikan semangat, mendukung menuju keberhasilan, serta berbagi cerita suka duka dalam berkeluh kesah

Keluarga Besar Magister Teknik Elektro 2019

Yang selalu memberi semangat, dukungan dalam proses yang sangat panjang, dan selalu berdiri bersama dalam perjuangan menuju kesuksesan

Almamaterku

Universitas Lampung

Bangsa dan Negaraku

Republik Indonesia

Terima kasih untuk semua yang telah diberikan kepadaku..*Jazzakallah Khairan*



MOTTO

“Hidup hanyalah sebuah proses, maka laluiilah dengan yakin. Jangan nodai proses hidup dengan keraguan”

“Jika sudah memulai maka harus sanggup menyelesaikan”

Ketika kita disuguhkan dengan kegagalan-kegagalan, yakinlah keberhasilan sudah dekat: “Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”

(Q.S. ALAM NASYRAH 94:5)

”

“Penilaian manusia itu relatif, benar menurut manusia belum tentu benar, salah belum tentu salah. Allah SWT penilai mutlak”

“Perkecillah dirimu, maka kau akan tumbuh lebih besar dari dunia. Tiadakan dirimu, maka jati dirimu akan terungkap tanpa kata-kata”

(Maulana Jalaluddin Rumi)

SAN WACANA

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Syukur Alhamdulillahirobbilalamin, Penulis haturkan puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah, serta inayah-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tesis dengan mempersembahkan judul tesis “Analisa Dampak Masuknya *Photovoltaic (PV)* dalam Skala Besar Terhadap Performa Sistem Tenaga Listrik” dengan sebaik-baiknya.

Shalawat beriring salam selalu tercurah kepada junjungan seluruh alam Nabi Muhammad SAW, sahabatnya, serta para pengikutnya yang selalu istiqomah diatas jalan agama islam hingga hari ajal menjemput.

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bimbingan, motivasi dan bantuan baik moral maupun materi oleh banyak pihak. Untuk itu dengan sepenuh ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Karomani, M. Si, Selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T. Selaku Direktur Program Pascasarjana Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Suharno, M.sc., Ph.D., IPU., ASEAN Eng. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

4. Bapak Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung sekaligus dosen pembimbing utama tesis yang banyak memberikan waktu, ide pemikiran dan semangat serta motivasi bagi penulis..
5. Bapak Misfa Susanto, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung.
6. Ibu Dr. Ir. Dikpride Despa, S.T., M.T., IPM. ASEAN.Eng. selaku dosen pembimbing kedua tesis, yang telah banyak memberikan waktu, pengalaman, motivasi dan pemikiran bagi penulis.
7. Bapak Dr. Eng. F.X. Arinto Setyawan, S.T., M.T. selaku pembimbing kedua tesis, yang telah banyak memberikan waktu, pengalaman, motivasi dan pemikiran bagi penulis.
8. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc. selaku dosen penguji utama yang telah banyak memberikan kritik dan saran yang bermanfaat bagi penulis.
9. Bapak Dr. Eng. Charles R. Harahap, S.T., M.T. selaku dosen penguji kedua sekaligus dosen pembimbing akademik yang telah banyak memberikan kritik, saran dan motivasi yang bermanfaat bagi penulis.
10. Seluruh Dosen Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung, berkat ilmu yang telah diajarkan kepada penulis selama penulis menjalani masa studi di perkuliahan.
11. Seluruh Tenaga Pendidik Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah banyak membantu kepada penulis, sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
12. Seluruh teman-teman Program Studi Magister Teknik Elektro Unila angkatan 2019 untuk kebersamaan yang telah dijalani. Tiada kata yang dapat penulis utarakan

untuk mengungkapkan perasaan senang dan bangga menjadi bagian dan juga beban dari angkatan 2019.

13. Serta semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Akhir kata, Penulis menyadari bahwa Tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, baik dari segi isi maupun cara penyajiannya. Oleh karena itu, Penulis sangat mengharapkan saran serta kritik yang bersifat membangun dari pembaca. Akhir kata sedikit harapan penulis semoga karya sederhana ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua. Aamiin Allahumma Aamiin.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Bandar Lampung, 22 November 2021

Penulis,



Ubaidah

DAFTAR ISI

Halaman

COVER	i
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	3
1.3 Perumusan Masalah	3
1.4 Manfaat	4
1.5 Hipotesis	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terdahulu	6
2.2 <i>Photovoltaic (PV)</i>	8
2.3 <i>Duck Curve/Kurva Bebek</i>	11
2.4 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik	14
2.5 <i>Turbine Governor Control</i>	16
III. METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Waktu dan Tempat	19
3.2 Tahap Penelitian	19
3.3 Diagram Alir Penelitian	21
3.4 Hasil yang Diharapkan	22
3.5 Skenario Simulasi	22
a. Data Sebaran Pembangkit Wilayah Lampung	22
b. Pembagian Jenis Peran Pembangkit	24
c. Tahapan Simulasi	26

d. Metode Analisis.....	26
IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Analisa	29
4.2 Pembahasan.....	35
a. <i>Ramp up</i> Horizon I.....	35
b. <i>Ramp up</i> Horizon II.....	40
V. SIMPULAN DAN SARAN	46
5.1 Simpulan	46
5.2 Saran	46
DAFTAR PUSTAKA.....	47
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.2 1 Skematik Prinsip Kerja PV [12]	8
Gambar 2.2 2 Rangkaian Ekuivalen PV[14].....	9
Gambar 2.2 3 Kurva karakteristik terhadap perubahan irradiance matahari	10
Gambar 2.2 4 Kurva karakteristik terhadap perubahan suhu[15].....	11
Gambar 2.2 5 Duck Curve California.....	12
Gambar 2.2 6 Kesetimbangan pembangkit dan beban[7]	15
Gambar 2.2 7 Frekuensi dan daya steady state turbin generator[19]	17
Gambar 3.3 1 Diagram Alir Penelitian	21
Gambar 3.6 1 Pembagian peran pembangkit	24
Gambar 3.6 2 Persentase generator setiap peran.....	25
Gambar 3.6 3 Kurva pembagian peran pembangkit	25
Gambar 3.6 4 Gradien Persamaan garis lurus	27
Gambar 4.1 1 Kurva beban seiring dengan kenaikan jumlah PV.....	29
Gambar 4.1 2 Radiasi yang dapat menghasilkan daya PV	30
Gambar 4.1 3 Kurva Beban yang Ditanggung oleh Generator Konvensional.....	31
Gambar 4.1 4 Horizon <i>ramp up</i> generator	34
Gambar 4.2 1 Kurva beban Saat PV 20%.....	36
Gambar 4.2 2 Kurva beban Saat PV 25%.....	37

Gambar 4.2 3 Kurva beban Saat PV 30%.....	38
Gambar 4.2 4 Kurva beban Saat PV 35%.....	39
Gambar 4.2 5 Kurva beban Saat PV 40%.....	40
Gambar 4.2 6 Kurva beban Saat PV 20% Horizon II.....	41
Gambar 4.2 7 Kurva beban Saat PV 25% Horizon II.....	42
Gambar 4.2 8 Kurva beban Saat PV 30% Horizon II.....	43
Gambar 4.2 9 Kurva beban Saat PV 35% Horizon II.....	44
Gambar 4.2 10 Kurva beban Saat PV 40% Horizon II.....	45

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.6 1 Sebaran Pembangkit Listrik Wilayah Lampung	24

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem pembangkitan listrik di Indonesia sebagian besar menggunakan pembangkit konvensional dan hanya sebagian kecil yang menggunakan Energi Baru Terbarukan (EBT) seperti turbin angin, solar panel, biogas dan sebagainya. Seiring berkembangnya teknologi dengan mempertimbangkan efek ekologi terhadap lingkungan dan sumber energi yang selalu tersedia, pemerintah Indonesia mulai menggalakkan penggunaan pembangkit dengan EBT yang tertuang dalam Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) [1] dan Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)[2]. Melihat potensi daerah di Indonesia yang merupakan daerah tropis mendorong untuk membangun pembangkit *photovoltaic* (PV) dengan target kapasitas 6,5 GW dan kapasitas yang telah dicapai adalah 0,002 GWp[1, 2].

PV merupakan pembangkit listrik yang menghasilkan listrik selama ketersediaan cahaya matahari masih ada [3]. Apabila intensitas cahaya matahari berkurang karena faktor menjelang sore hari, maka daya keluaran PV juga akan berubah mengikuti perubahan intensitas cahaya matahari tersebut[4]. Sehingga pembangkit konvensional harus mengejar kekurangannya yang ada pada sistem, sedangkan setiap pembangkit memiliki karakteristik *ramping rate* yang berbeda serta

kecepatan pada saat *ramp up* tidak secepat saat pembangkit *ramp down*[5]. *Ramping rate* merupakan batas dari laju perubahan daya output pembangkit[6]. Kondisi daya keluaran PV yang fluktuatif dan karakteristik *ramping rate* pembangkit konvensional yang berbeda dapat menyebabkan ketidaksetimbangan antara daya pembangkit dan daya beban. Ketidaksetimbangan tersebut dapat mengakibatkan penyimpangan frekuensi dari nilai nominalnya [7]. Jika hal ini diabaikan, maka dapat mempengaruhi kualitas dan keandalan sistem tenaga listrik[8].

Seperti peristiwa yang terjadi di California akibat PV yang terus bertambah setiap tahun dari 2012 sampai 2020 sehingga terjadi permintaan *ramping rate* tinggi pada saat cahaya matahari mulai berkurang akibat kondisi sore hari. Kurva beban yang harus ditanggung oleh generator konvensional akibat penambahan PV membentuk *duck curve*. Karena komposisi pembangkit yang dimiliki oleh California memiliki karakteristik *ramping rate* yang tinggi, maka masalah tersebut dapat teratasi. Berdasarkan hal tersebut, kemampuan sistem tenaga listrik dalam menjaga keseimbangan daya antara pembangkit dan permintaan beban juga berpengaruh terhadap komposisi pembangkit.

Pada penelitian sebelumnya, untuk mengatasi masalah tersebut adalah ditambahkan pembangkit dengan karakteristik *ramping rate* yang tinggi seperti PLTG atau Baterai. Pada penelitian ini digunakan solusi dengan membatasi jumlah PV yang masuk ke sistem tenaga listrik menggunakan komposisi pembangkit PLTA, PLTP, PLTMG, PLTU, PLTG dan PLTD berdasarkan data dari sistem kelistrikan Lampung.

1.2 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat menganalisis dampak penambahan PV 20%, 25%, 30%, 35% dan 40% dari pembangkit keseluruhan terhadap performa sistem tenaga listrik
2. Memberikan rekomendasi terhadap dampak penambahan PV dalam skala besar terhadap performa sistem tenaga listrik

1.3 Perumusan Masalah

Tahap awal sistem tenaga listrik hanya terdiri dari pembangkit konvensional dan kondisi setimbang. Kemudian ditambah PV dengan presentase perbandingan terhadap total pembangkit berturut-turut 20%, 25%, 30%, 35% dan 40% dalam sistem tenaga listrik. Pada saat daya yang dihasilkan PV mengalami penurunan akibat kondisi menjelang sore, pembangkit konvensional harus mengejar kekurangan daya yang ada pada sistem. Sedangkan setiap pembangkit memiliki karakteristik *ramping rate* yang berbeda. Hal ini dapat menyebabkan ketidaksetimbangan antara daya pembangkit dan daya yang diminta oleh beban, sehingga dapat mengakibatkan penyimpangan frekuensi dari nilai nominalnya. Untuk mengatasi hal tersebut terdapat beberapa solusi, yaitu perlu membatasi jumlah PV yang masuk ke sistem, menambahkan pembangkit yang mempunyai *ramping rate* tinggi atau menambahkan *Battery Energy Storage System* (BESS). Dalam penelitian ini solusi yang diterapkan adalah dengan membatasi jumlah PV yang masuk ke sistem.

1.4 Manfaat

Manfaat penelitian ini adalah

1. Mengetahui dampak penambahan PV 20%, 25%, 30%, 35% dan 40% dari pembangkit keseluruhan terhadap performa sistem tenaga listrik
2. Mendapatkan rekomendasi akibat dampak penambahan PV dalam skala besar terhadap performa sistem tenaga listrik

1.5 Hipotesis

Saat daya yang dihasilkan oleh PV mengalami penurunan akibat menurunnya tingkat radiasi matahari pada kondisi siang hari menjelang sore, daya beban yang diampu oleh generator konvensional menjadi bertambah. Pembangkit konvensional harus mengejar kekurangan daya yang ada pada sistem. Apabila daya pembangkit tidak dapat mengejar kekurangan daya tersebut, maka akan terjadi ketidaksetimbangan sistem tenaga listrik yang dapat mempengaruhi kualitas dan keandalan. Sedangkan setiap pembangkit memiliki karakteristik *ramping rate* yang berbeda. Solusi untuk mengatasi hal tersebut yaitu dengan membatasi jumlah PV yang masuk ke sistem. Batas PV yang diperbolehkan ada pada sistem tenaga listrik adalah sebesar 30% dari jumlah total keseluruhan pembangkit. Apabila melebihi jumlah tersebut maka akan terjadi ketertinggalan daya antara pembangkit dan beban, sehingga dapat menyebabkan ketidaksetimbangan sistem tenaga listrik.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan akhir ini dibagi menjadi lima bab yaitu:

BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini memaparkan latar belakang, masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, perumusan masalah, hipotesis dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

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

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini memaparkan waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, metode penelitian yang digunakan, serta pelaksanaan dan pengamatan penelitian.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

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

BAB V. KESIMPULAN

Pada bab ini menjelaskan kesimpulan yang didasarkan pada hasil data dan pembahasan dari penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam melakukan penelitian perlu dilakukan peninjauan terkait dengan penelitian yang telah dilakukan atau penelitian sebelumnya agar mendapatkan referensi yang sesuai dengan penelitian yang dilakukan, yaitu mengenai dampak masuknya PV dalam sistem tenaga listrik.

Berikut beberapa uraian yang terkait dengan penelitian terdahulu yang digunakan sebagai acuan penelitian:

1. Amir Saman Arabali, Payman Dehghanian, dkk (2012) : “*The Impact of Dispersed PV Generation on Ramp Rate Requirements Ramp Rate Requirements*”.

Pada penelitian ini dilakukan evaluasi terhadap pembangkit PV yang terdistribusi dan menganalisa dampak potensial terhadap kebutuhan *ramp rate* dan biaya operasional pada sistem tenaga dengan masuknya PV skala besar. Menggunakan pendekatan *curve fitting*, PV dan beban dimodelkan secara stokastik serta diujikan pada sistem 24-bus IEEE dengan mengujikan beberapa skenario. Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh, Pembangkit PV terdistribusi di seluruh Sistem 24-bus IEE dapat secara signifikan menurunkan kebutuhan *ramp rate* dan biaya energi konvensional pada batas tingkat *ramp rate* tertentu.[4]

2. Danling Cheng, Barry Mather, Richard Seguin, dkk (2015) : “*PV Impact Assessment for Very High Penetration Levels*”.

Pada penelitian ini menjelaskan pendekatan granular untuk mengetahui dampak penetrasi pembangkit PV yang sangat tinggi. Penelitian ini menggunakan dua *feeder* distribusi yang terhubung dengan pembangkit PV. Studi ini mencakup analisis aliran daya *steady-state* dan *time series*, yang mencakup efek radiasi matahari yang berbeda-beda. Tujuan penelitian ini adalah untuk memprediksi efek akibat meningkatnya tingkat pembangkit PV dalam skala besar. PV yang diujikan mencapai 300% dari pembangkit keseluruhan. Perubahan daya yang dihasilkan PV akibat perubahan radiasi berpotensi menyebabkan penyimpangan tegangan dari nilai nominalnya.[9]

3. Qingchun Houa , Ning Zhanga , Ershun Du, dkk (2019) :” *Probabilistic duck curve in high PV penetration power system: Concept, modeling, and empirical analysis in China*”

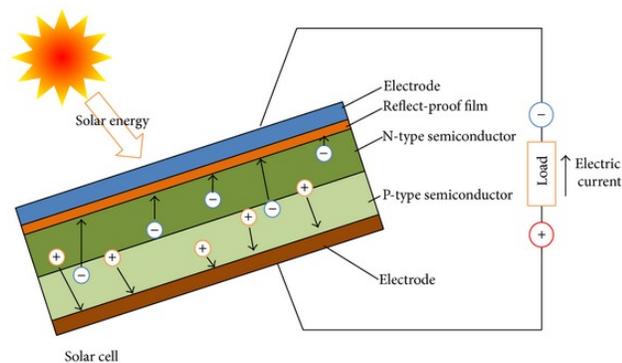
Penelitian ini dilatar belakangi oleh penetrasi fotovoltaik (PV) yang tinggi membentuk kembali kurva beban listrik yang harus ditanggung oleh generator konvensional dan memiliki dampak yang signifikan pengoperasian dan perencanaan sistem tenaga. Pada penelitian ini terdapat Konsep kurva bebek yang banyak digunakan untuk menggambarkan waktu ketidakseimbangan antara permintaan beban puncak dan generasi PV skala besar.[10]

4. Qi Wang, Quan Yuan, Yi Tang (2019) : “*A Demand Response Strategy in High Photovoltaic Penetration Power Systems Considering the Thermal Ramp Rate Limitation*”.

Penelitian ini mengembangkan strategi respons kebutuhan beban dengan mempertimbangkan *slope* dari kurva beban. Hal ini menjadi solusi generator termal untuk menjaga keseimbangan daya antara pembangkit dan beban, bahkan dengan keterbatasan *ramping rate*. [11]

2.2 Photovoltaic (PV)

PV merupakan peralatan yang dapat mengubah radiasi cahaya matahari menjadi energi listrik. PV terdiri dari sel-sel PV yang disusun oleh bahan semikonduktor, yaitu dioda P-N junction. PV dapat menghasilkan listrik melalui proses *photoelectric*, ketika partikel terkecil cahaya matahari (foton) teradiasi pada sel PV maka sel PV akan memproduksi energi listrik seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.1 Besar atau kecilnya daya yang dihasilkan oleh PV dipengaruhi oleh radiasi cahaya matahari dan temperature pada modul PV [12].

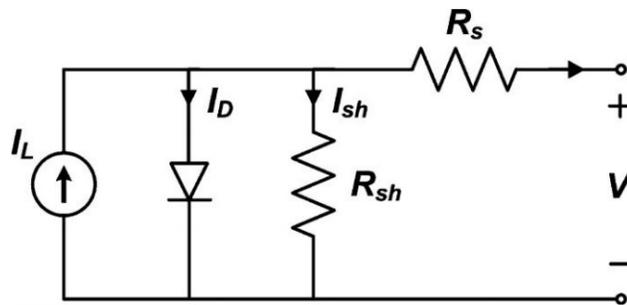


Gambar 2.2 1 Skematik Prinsip Kerja PV [12]

Telah dijelaskan oleh Maxwell tentang radiasi electromagnet bahwa cahaya dapat dianggap sebagai spectrum gelombang elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang berbeda. Pada gambar 2.2.1 prinsip kerja dari PV berdasarkan pada *photovoltaic effect* dijelaskan oleh Albert Einstein pada tahun 1905, bahwa cahaya terdiri dari kuantum energi yang didefinisikan pada persamaan berikut ini

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

Dimana h adalah konstanta Planck dan ν adalah frekuensi cahaya [13].



Gambar 2.2 2 Rangkaian Ekuivalen PV [14]

Rangkaian ekuivalen PV seperti ditunjukkan pada gambar 2.2.2 terdiri dari sumber arus, dioda, dan dua resistor [14]. Rumusan matematis dari rangkaian ekuivalen PV dapat ditulis sebagai berikut

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (2.2)$$

$$I(V) = I_L - I_o (e^{(V+IR_s)/a} - 1) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

Dengan nilai a sebagai berikut

$$a = \frac{N_S n k T}{q} \quad (2.4)$$

Dimana,

I = arus PV (A)

I_0 = arus saturasi dioda (A)

V = Tegangan terminal PV (V)

I = Arus terminal PV (A)

I_L = *photocurrent* (A)

I_D = arus diode (A)

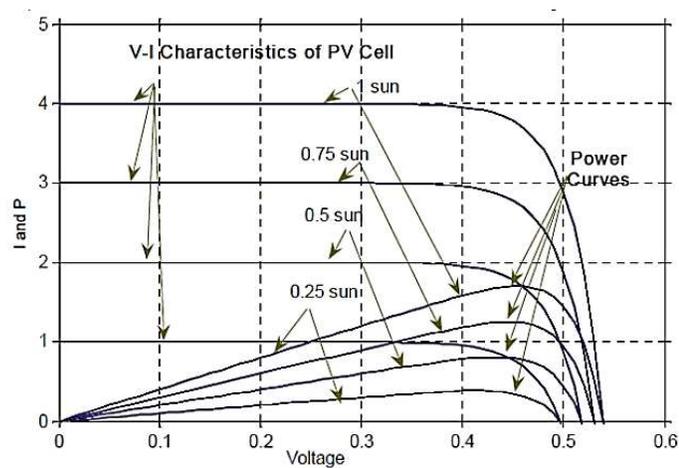
I_{sh} = arus shunt resistor (A)

R_s = Hambatan Seri (Ω)

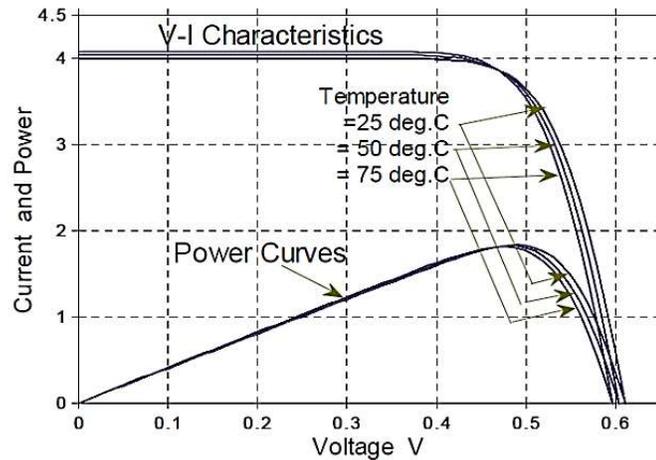
R_{sh} = Hambatan *Shunt* (Ω)

a = Faktor idealitas yang dimodifikasi

Kurva karakteristik PV ditunjukkan pada Gambar 2.2.3 dan Gambar 2.2.4 berikut



Gambar 2.2 3Kurva karakteristik terhadap perubahan irradiance matahari

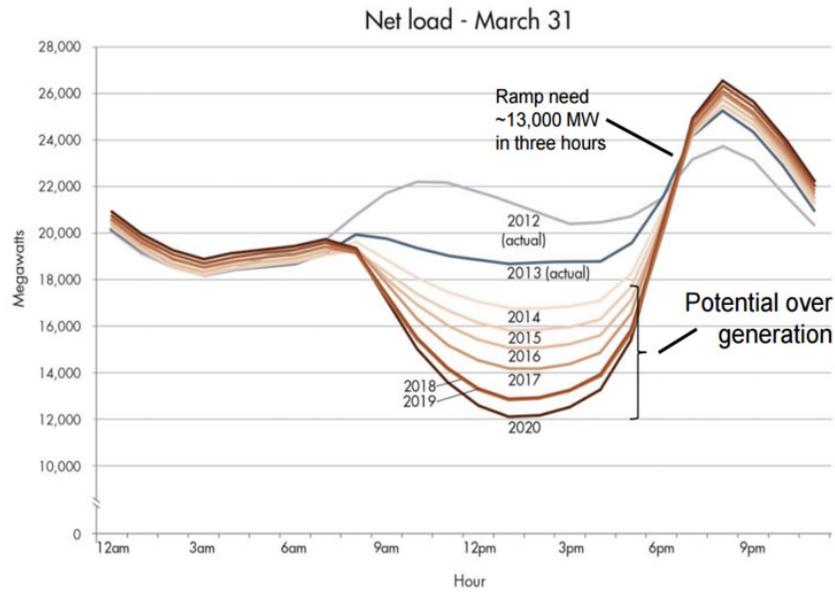


Gambar 2.2 4 Kurva karakteristik terhadap perubahan suhu[15]

2.3 Duck Curve/Kurva Bebek

Dinamakan kurva bebek karena bentuknya menyerupai bebek. Duck curve adalah grafik yang menunjukkan perbedaan permintaan listrik di sistem dan jumlah energi matahari yang tersedia sepanjang hari yang dibuat oleh California Independent System Operator (ISO)[16]. Fenomena ini menggambarkan aspek penting dari tantangan yang dihadapi oleh energi terbarukan seperti tenaga surya bagi manajer utilitas, seiring perkembangan teknologi yang sangat pesat.

Duck curve pada gambar di bawah ini menunjukkan garis berbeda-beda yaitu garis permintaan beban listrik dikurangi pasokan energi matahari selama periode 24 jam di California, dengan setiap baris mewakili tahun yang berbeda, dari 2012 hingga 2020. Sehingga kurva yang ditampilkan adalah kurva beban yang harus ditanggung oleh generator konvensional.



Gambar 2.2 5 Duck Curve California

Seperti yang terlihat pada grafik, energi matahari tersedia paling baik selama jam-jam cerah, yang membuat permintaan energi sangat rendah. Kondisi permintaan daya beban yang harus ditanggung oleh generator konvensional disebut dengan perut bebek: titik permintaan terendah. Permintaan mulai meningkat pesat saat matahari terbenam dan orang-orang tiba di rumah pada pukul 6 sore. Tidak ada matahari untuk menyalakan semua peralatan yang dinyalakan oleh orang-orang yang pulang kerja atau sekolah, dan pembangkit listrik konvensional harus menanggung kekurangan daya yang ada. Oleh karena itu, permintaan meningkat sangat cepat (leher bebek) hingga puncaknya pada sore hari (kepala bebek).

Kurva Bebek menunjukkan dua titik permintaan yang tinggi: ekor bebek dan kepala bebek. Permintaan energi mencapai puncaknya pada pagi hari (pukul 06.00 dan 09.00, ekor bebek) dan sore hari (pukul 18.00 dan 21.00, kepala

itik). Dengan kata lain, orang bangun untuk bersiap-siap untuk melakukan kegiatan dan menggunakan banyak energi, dan kemudian ketika mereka pulang dari hari kerja mereka dan perlu menyalakan lampu, TV, dan peralatan lainnya. Energi matahari, bagaimanapun juga PV hanya dapat menghasilkan daya selama jam-jam hari cerah pada saat pengguna sedang beraktifitas diluar rumah.

Untuk mempertahankan efisiensi tertinggi, regulator akan sering mematikan pembangkit listrik *peaker* dan menurunkan pembangkit dasar selama masa permintaan yang sangat rendah, seperti jam-jam "perut bebek". Namun, peningkatan permintaan yang tiba-tiba dan cepat membuat regulator harus segera menghidupkan kembali pembangkit listrik ini, yang tidak hanya mahal, tetapi juga dapat menyebabkan lebih banyak polusi dan biaya perawatan yang tinggi.

Masalah lain dengan lekukan bebek terletak di perut bebek. Di beberapa tempat, permintaan menjadi sangat rendah sehingga operator jaringan terpaksa mematikan pembangkit listrik *peaker* dan menurunkan pembangkit listrik baseline. Kemudian, hanya beberapa jam kemudian, mereka semua harus ditingkatkan lagi dengan sedikit atau tanpa peringatan, yang dapat menyebabkan masalah pada stabilitas jaringan.

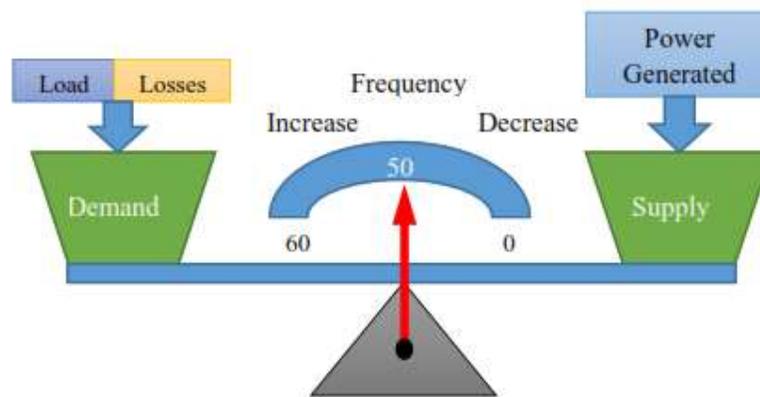
Jadi masalah dengan kurva bebek terletak pada perubahan permintaan yang tiba-tiba dan curam. Operator jaringan dan regulator berjuang untuk menjaga stabilitas dan efisiensi dengan menyalakan dan mematikan pembangkit listrik, menyebabkan ketidakstabilan pada pasokan listrik, biaya besar bagi pembayar pajak, dan pencemaran lingkungan.[17]

2.4 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Fungsi dari sistem tenaga listrik adalah untuk mengkonversi energi dari suatu energi yang disediakan oleh alam baik itu terbarukan maupun tidak menjadi energi listrik untuk kebutuhan sehari-hari. Energi listrik jarang digunakan dalam bentuk listrik saja, tetapi kebanyakan harus dikonversi terlebih dahulu menjadi cahaya, gerak, panas dll. Dalam penggunaannya energi listrik dapat dikendalikan oleh operator. Perancangan dan pengoperasian sistem yang baik harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- a. Saat kondisi beban yang berubah-ubah, sistem harus memenuhi permintaan daya aktif dan reaktif. Energi listrik tidak dapat disimpan sehingga dalam pengoperasian sistem harus diperhatikan dan dikontrol dengan tepat.
- b. Sistem harus dapat menyediakan energi dengan pengeluaran biaya yang minimum dan dampak ekologi yang minimum.
- c. Kualitas dari *power supply* harus memenuhi standar minimum, yaitu frekuensi yang konstan, tegangan yang konstan dan tingkat keandalan[8]

Secara umum kesetimbangan antara pembangkit dan beban ditunjukkan pada gambar 2.2.5. sebagai berikut:



Gambar 2.2 6 Keseimbangan pembangkit dan beban[7]

Pada sistem tenaga listrik terdapat prinsip keseimbangan, dimana jumlah daya yang dibangkitkan harus sama dengan jumlah daya yang digunakan, yang ditulis seperti persamaan 2.5 berikut ini:

$$P_m = P_e \quad (2.5)$$

Dimana P_m adalah daya mekanik dan P_e adalah daya elektrik.

Apabila daya pada sistem mengalami perubahan, maka frekuensi pada sistem juga akan mengalami perubahan, seperti persamaan 2.6 berikut:

$$\Delta P = \frac{d\omega}{dt} H_{system} \quad (2.6)$$

Namun, berdasarkan asumsi konservatif, efek dari governor dapat diabaikan sehingga frekuensi dinamis dapat diuraikan pada persamaan 2.7 berikut:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H_{system}} (P_m - P_e) \quad (2.7)$$

Dimana $d\omega/dt$ menunjukkan frekuensi angular terhadap waktu, H_{system} adalah inersia konstan sistem, P_m adalah daya mekanik, P_e adalah daya elektrik. Dari

persamaan (2.7) diatas $\omega=2\pi f$, frekuensi sistem akan berubah jika daya pada sistem tidak setimbang[18].

2.5 Turbine Governor Control

Turbin-generator pada sistem tenaga beroperasi memutas massa sehingga menyimpan energi kinetik. Apabila beban tiba-tiba meningkat dengan jumlah pembangkit yang sama maka putaran turbin akan mengalami penurunan sehingga menyebabkan penurunan frekuensi pada sistem. Kemudian apabila beban tiba-tiba menurun, maka putaran turbin akan naik. Dari hukum newton dua yang merupakan prinsip dasar dalam dinamika rotor menyatakan

$$J\alpha = T_m - T_e \quad (2.8)$$

Dimana :

$J\alpha$ = Momen inersi dari rotor ($\alpha = d\omega/dt$)

T_m = Torsi mekanik

T_e = Torsi elektrik

ω = kecepatan sudut perputaran generator

Dengan

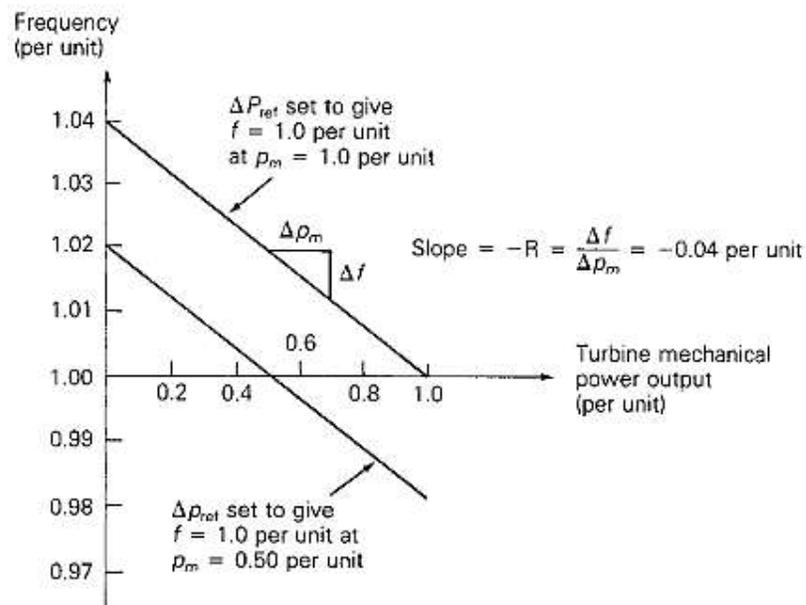
$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.9)$$

Dari persamaan (2.9) apabila nilai T_m lebih besar dari T_e maka tercipta kelebihan

torsi sebesar $J\alpha$ yang menyebabkan timbulnya percepatan rotor sebesar $d\omega/dt$ sehingga frekuensi tegangan yang dibangkitkan naik sampai tercapai nilai tertentu, begitu juga sebaliknya [19], sehingga dituliskan sebagai berikut:

- Jika $T_m - T_e = \Delta T < 0$, maka $d\omega/dt < 0$, sehingga frekuensi akan turun
- Jika $T_m - T_e = \Delta T > 0$, maka $d\omega/dt > 0$, sehingga frekuensi akan naik

Namun secara tidak langsung penyediaan daya reaktif dapat pula mempengaruhi frekuensi sistem, karena penyediaan daya reaktif mempunyai pengaruh besar terhadap kenaikan tegangan, yang selanjutnya dapat menyebabkan kenaikan beban daya aktif [20]. Hubungan frekuensi dan daya steady state untuk turbin generator ditunjukkan pada gambar 2.2.6. berikut



Gambar 2.2 7 Frekuensi dan daya *steady state* turbin generator[19]

Hubungan frekuensi dan daya saat keadaan steady state pada kendali turbin generator ditunjukkan pada persamaan (2.10) berikut ini:

$$\Delta P_m = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta f \quad 2.10$$

Dimana Δf adalah perubahan frekuensi, ΔP_m adalah perubahan output daya mekanik pada turbin, dan P_{ref} adalah perubahan pengaturan daya referensi, serta adalah regulasi konstan. Apabila ΔP_{ref} tetap, ΔP_m berbanding lurus dengan penurunan frekuensi [19].

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan April 2021 – Juli 2021 di Laboratorium Terpadu Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.

3.2 Tahap Penelitian

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

1. Studi Literatur

Studi literatur yaitu mempelajari materi yang berkaitan dengan tugas akhir. Materi tersebut berasal dari berbagai referensi atau sumber – sumber ilmiah lainnya seperti jurnal ilmiah, buku – buku yang terkait dengan penelitian.

2. Studi Bimbingan

Penulis juga melakukan studi bimbingan yaitu dengan cara berdiskusi dan tanya jawab dengan dosen pembimbing untuk menambah wawasan dan menyelesaikan kendala yang terjadi saat melaksanakan penelitian.

3. Pengambilan dan Pengolahan Data

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

- a. Radiasi Matahari
- b. Model Matematis PV
- c. Data pembangkit wilayah Lampung
- d. Data beban wilayah Lampung
- e. Data *Ramping rate*

Kemudian data tersebut akan diolah menggunakan program DigSilent

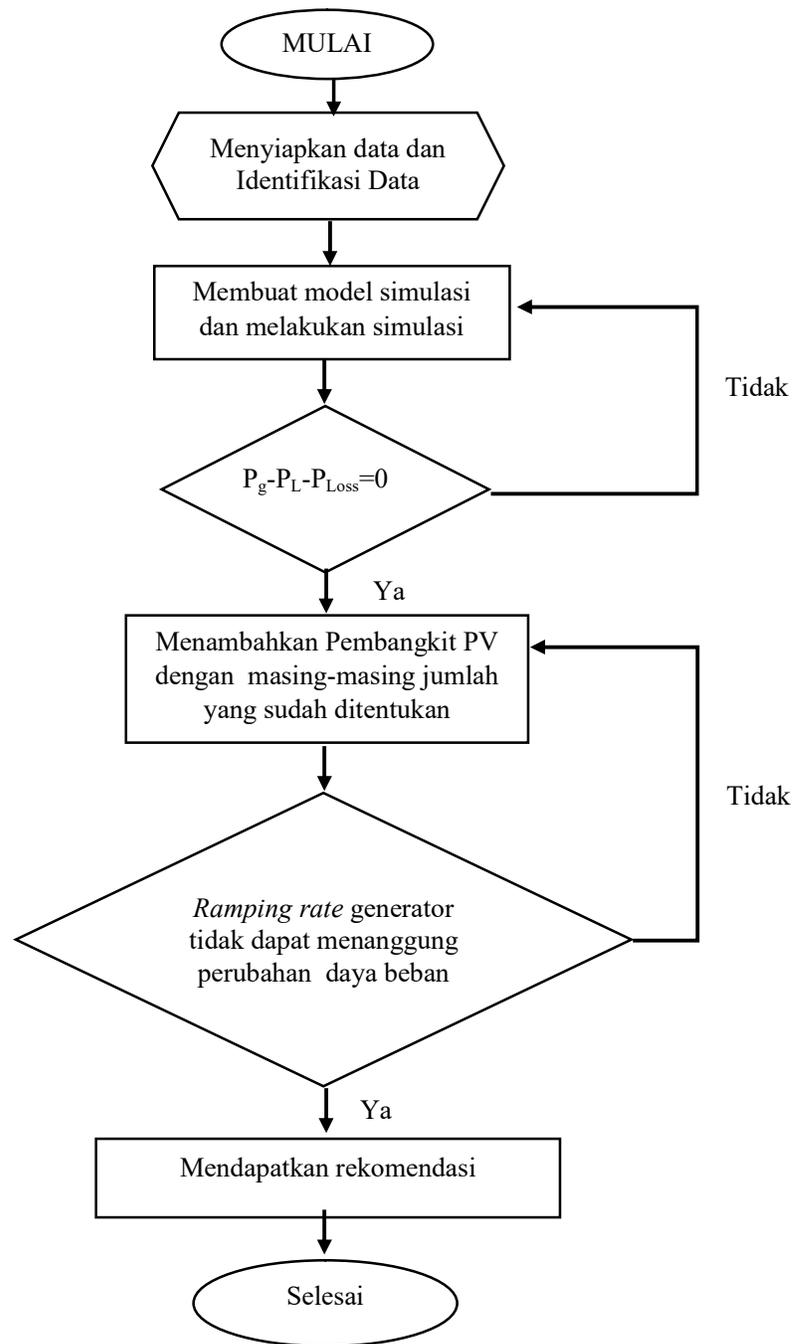
4. Pembuatan Laporan

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

5. Bimbingan Penelitian

Penulis melakukan bimbingan penelitian dengan menerima masukan-masukan terhadap hal yang diteliti agar data hasil penelitian jelas, terarah dan valid.

3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.3 1 Diagram Alir Penelitian

3.4 Hasil yang Diharapkan

Hasil yang diharapkan pada penelitian ini adalah memperoleh rekomendasi untuk mengatasi dampak masuknya PV dalam kapasitas besar terhadap performa sistem tenaga listrik.

3.5 Skenario Simulasi

a. Data Sebaran Pembangkit Wilayah Lampung

Di wilayah Lampung menggunakan beberapa jenis pembangkit listrik diantaranya yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm), Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan dirincikan sebagai berikut:

1. PLTA tersebar di tiga wilayah yakni Batutegi 2x14.4 MW, Semaka 2x28 MW dan Besai 2x44.42 MW.
2. PLTD tersebar di 4 wilayah yakni Teluk Betung 10 MW, Tegineneng 3x9.5 MW, Sebesi 3x100 kW dan Tarahan terdapat tiga pembangkit diesel yaitu 1x10.5 MW, 3x8.8 MW, 3x6.3 MW.
3. PLTG hanya terdapat di Tarahan sebanyak 2 pembangkit yaitu MPP Tarahan 4x25 MW dan Tarahan 21 MW.
4. PLTMG terdapat di dua wilayah yaitu Sutami 6x5.5 MW dan New Tarahan 6x5.5 MW.
5. PLTP hanya terdapat di satu wilayah yaitu ulubelu dengan kapasitas terpasang 4x55 MW.

6. PLTU terdapat di empat wilayah yaitu Tarahan 10 MW, New Tarahan 2x100 MW, Sebalang 2x100 MW dan Lampung Tengah 2x7 MW.
7. PLTS terpasang di beberapa pulau-pulau kecil yang tersebar di wilayah Lampung yakni pulau Sebuku 30kWp, Siuncal 18kWp, Legundi 75kWp, Pahawang 20kWp, Suka Banjar 30kWp. Selain itu juga terpasang di Kabupaten Mesuji yakni Sri Tanjung 20kWp, Kagungan Dalam 15kWp, Suka Maju 15kWp, Mulyo Asri 20kWp, Sungai Buaya 15kWp, Sungai Sidang 30kWp, Talang Batu 20kWp, Sungai Cambai 15kWp, Labuhan Batin 5kWp dan Sidang Muara Jaya 15kWp. Di Kabupaten Pesawaran yakni Bayas Jaya 30kWp, Maja 30kWp dan Pagar Jaya 20 kWp. Di Kabupaten Tanggamus terdapat di Banjar Agung 2x20kWp, Margo Mulyo 50kWp, Pesahguan 30kWp, Purwodadi 50kWp, Guring Atas 20kWp, Teluk Brak 50kWp, Karang Brak 75kWp, Way Asahan 30kWp dan Paku 30kWp. Kemudian di Kabupaten Pesisir Barat yakni Bandar Dalam 75kWp, Way Tias 30kWp, Way Haru 75kWp dan Siring Gading 30kWp.

Berdasarkan data diatas data sebaran pembangkit listrik wilayah lampung ditunjukkan pada table berikut ini.

Tabel 3.6 1 Sebaran Pembangkit Listrik Wilayah Lampung
(Sumber: Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral 2019)

Jenis Pembangkit	Kapasitas Terpasang	Total
PLTU	424 MW	1,1 GW
PLTP	220 MW	
PLTA	173,64 MW	
PLTG	121 MW	
PLTD	94,6 MW	
PLTMG	66 MW	
PLTS	1,248 MWp	

b. Pembagian Jenis Peran Pembangkit

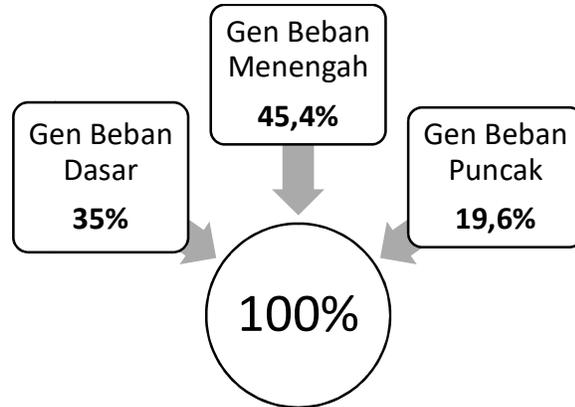
Dalam sistem tenaga listrik terdapat 3 jenis peran pembangkit, yaitu pembangkit yang melayani beban dasar, beban menengah dan beban puncak.

Berikut merupakan rincian pembagian peran pembangkit yang digunakan pada simulasi.

Generator Beban Dasar	Generator Beban Menengah	Generator Beban Puncak
<ul style="list-style-type: none"> • PLTA • PLTP 	<ul style="list-style-type: none"> • PLTMG • PLTU 	<ul style="list-style-type: none"> • PLTG • PLTD

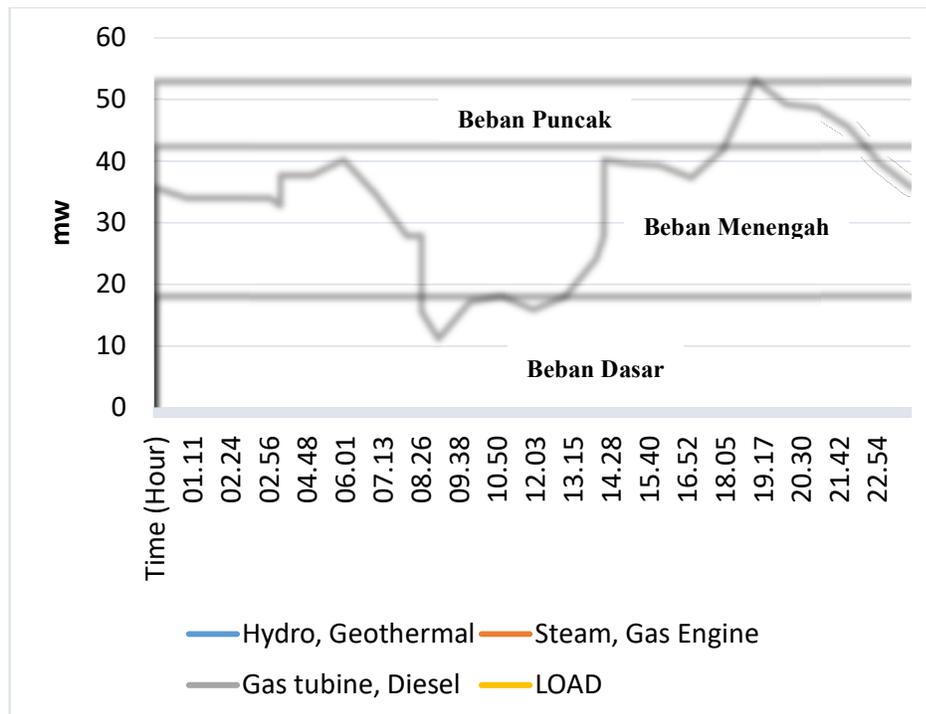
Gambar 3.6 1 Pembagian peran pembangkit

Perbandingan besar setiap peran pembangkit ditunjukkan pada gambar 3.5.2 berikut ini



Gambar 3.6 2 Persentase generator setiap peran

Persentase jumlah generator setiap peran didefinisikan seperti gambar 3.6.3 di bawah ini



Gambar 3.6 3 Kurva pembagian peran pembangkit

c. Tahapan Simulasi

Simulasi penelitian ini terdapat beberapa kasus, kemudian hasil dari simulasi beberapa kasus dibandingkan sehingga didapatkan jumlah PV yang diperbolehkan berada pada sistem tenaga listrik.

1) Kasus I

Pada skenario ini, PV masuk ke sistem sebesar 20% dari total pembangkitan yang ada.

2) Kasus II

Pada skenario ini, PV masuk ke sistem sebesar 25% dari total pembangkitan yang ada.

3) Kasus III

Pada skenario ini, PV masuk ke sistem sebesar 30% dari total pembangkitan yang ada.

4) Kasus IV

Pada skenario ini, PV masuk ke sistem sebesar 35% dari total pembangkitan yang ada.

5) Kasus V

Pada skenario ini, PV masuk ke sistem sebesar 40% dari total pembangkitan yang ada.

d. Metode Analisis

Data yang didapat dari penelitian ini berbentuk grafik sehingga analisa matematis yang dilakukan adalah dengan menggunakan persamaan gradien $y = mx + C$

Ramping rate merupakan perubahan daya per satuan waktu dengan Persamaan matematis sebagai berikut:

$$\text{Ramp rate} = \frac{\Delta P}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Seperti yang kita ketahui bahwa persamaan gradient adalah

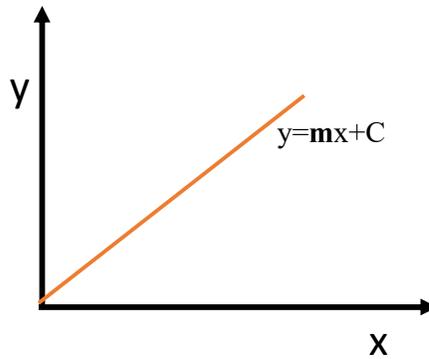
$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (3.2)$$

Sehingga dari persamaan (3.1) dan (3.2) didapatkan

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \text{ramping rate} \quad (3.3)$$

Berdasarkan persamaan (3.3) gradient **m** sama dengan *ramping rate*.

Grafik persamaan garis lurus ditunjukkan pada gambar 3.6.4 berikut



Gambar 3.6 4 Gradien Persamaan garis lurus

Dimana y adalah selisih daya beban sebelum dan setelah terjadi perubahan daya, **m** adalah *ramping rate* generator maksimal untuk memenuhi kebutuhan daya beban. t atau x adalah waktu dan C adalah konstanta.

Apabila m yang dibutuhkan melebihi batas maksimum m yang dapat ditanggung oleh generator, maka daya beban tidak terpenuhi. Sehingga diambil nilai m yang sama dengan atau kurang dari batas maksimum yang dapat ditanggung oleh generator konvensional sebagai batasan yang PV diperbolehkan ada dalam system tenaga listrik.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan dengan berbagai skenario komposisi pembangkit, dapat disimpulkan bahwa maksimum pembangkitan yang berasal dari PV dalam suatu sistem kelistrikan atau sistem interkoneksi yang ada di Lampung adalah 30% dari total pembangkit.

Apabila komposisi pembangkitan yang berasal dari PV lebih dari 30%, maka sistem kehilangan kemampuan untuk mencapai kesetimbangan antara pembangkitan dan beban.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah menambahkan generator dengan karakteristik *ramping rate* yang tinggi atau *Battery Energy Storage System* (BESS) agar generator dapat mengejar ketertinggalan daya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. RI, "Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 Tentang Kebijakan Energi Nasional," Pemerintah RI, Jakarta, 2014.
- [2] P. RI, "Keputusan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 Tentang Rencana Kebijakan Energi Nasional," Pemerintah RI, Jakarta, 2017.
- [3] M. J. B. Buni and A. A. K. Al-Walie, "Effect of Solar Radiation on Photovoltaic Cell," *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, vol. 3, no. 3, pp. 47-51, 2018.
- [4] A. S. Arabali and P. Dehghanian, "The Impact of Dispersed PV Generation on Ramp Rate Requirements," in *IEEE*, Venice, Italy, 2012.
- [5] J. Marcos and O. Storkel, "Storage requirements for PV power ramp-rate control," *ELSEVIER*, vol. 99, pp. 28-35, 2014.
- [6] Y. Simamora and Samsurizal, "PEMBAGIAN PEMBANGKITAN SISTEM PEMBANGKIT TERMAL PADA KONDISI BEBAN YANG BERUBAH TERHADAP WAKTU MENGGUNAKAN QUADRATIC PROGRAMMING," *ENERGI DAN KELISTRIKAN*, vol. 10, no. 1, pp. 78-83, 2018.
- [7] Ubaidah and Khairudin, "LOAD FREQUENCY CONTROL (LFC) PADA MIKROGRID MENGGUNAKAN BULK STORAGE BATTERY," *Teknosia*, vol. 3, no. 2, pp. 11-15, 2017.
- [8] K. Prabha, *Power System Stability and Control*, New Jersey: Pentice Hall, 1993.
- [9] D. Cheng and B. Mather, "PV Impact Assessment for Very High Penetration Levels," in *IEEE*, Blacksburg, 2015.
- [10] Q. Hou, N. Zhang and E. Du, "Probabilistic duck curve in high PV penetration power system: Concept, modeling, and empirical analysis in China," *ELSEVIER*, vol. 242, pp. 205-215, 2019.
- [11] Q. Wang and Q. Yuan, "A Demand Response Strategy in High Photovoltaic Penetration Power Systems Considering the Thermal Ramp Rate Limitation," in *IEEE*, China, 2019.

- [12] H. L. Zhang and T. V. Gerven, "Photovoltaics," *Reviewing the European Feed-in-Tariffs and Changing PV Efficiencies and Costs*, pp. 1-11, 14 Mei 2014.
- [13] O. E. Global, "TUdelft," TU Delft OpenCourseWare, [Online]. Available: https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/solar_energy_section_3.pdf. [Accessed 20 11 2020].
- [14] M. T. Boyd, S. A. Klein and D. T. Reindl, "Evaluation and Validation of Equivalent Circuit Photovoltaic Solar Cell Performance Models," *ASME*, vol. 133, pp. 1-13, 2011.
- [15] M. Petkov, "Modelling of Electrical Characteristics of Photovoltaic Power Supply Sources," *Brief Scientific Paper Contemporary Materials (Renewable Energy Source)*, vol. II, no. 2, pp. 171-177, 2011.
- [16] p. b. corporation, "The ISO “manages the flow of electricity across the high-voltage, long-distance power lines that make up 80 percent of California’s and a small part of Nevada’s grid. The nonprofit public benefit corporation keeps power moving to homes and communities.,” 2020.
- [17] E. Alabama, "Energy Alabama," Energy Alabama, 09 May 2017. [Online]. Available: <https://alcse.org/the-duck-curve-what-is-it-and-what-does-it-mean>. [Accessed 02 April 2021].
- [18] P. M. Anderson and M. Mirheydar, "A low-order system frequency response model," *IEEE*, vol. 5, no. 3, pp. 720 - 729, 1990.
- [19] J. D. GLOVER and M. S. SARMA, POWER SYSTEM ANALYSIS FIFTH EDITION, Stamford, USA: Nelson Education, Ltd., 2012.
- [20] Zuhail, Dasar Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya, Jakarta: Grahamedia.