

**PENYELESAIAN *DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH* MENGGUNAKAN  
*EQUILIBRIUM OPTIMIZER (EO)***

**(Skripsi)**

**Oleh**

**MANGASI YANUARDO TOGATOROP**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS LAMPUNG**

**2022**

## ABSTRAK

### **PENYELESAIAN *DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH* MENGUNAKAN *EQUILIBRIUM OPTIMIZER (EO)***

Oleh

**MANGASI YANUARDO TOGATOROP**

Energi listrik merupakan energi yang dibutuhkan untuk menunjang segala aktivitas serta menjadi salah satu bagian dalam kehidupan manusia. Semakin meningkatnya perekonomian masyarakat maka secara otomatis kebutuhan akan tenaga listrik atau kebutuhan beban pada pembangkit listrik akan meningkat. Untuk mengoptimalkan penggunaan biaya bahan bakar dengan tetap memenuhi kebutuhan beban dapat diselesaikan dengan menggunakan Analisis *Dynamic Economic Dispatch* (DED) dimana analisis ini merupakan pengembangan konvensional dari *Economic Dispatch* (ED) dimana DED digunakan untuk menentukan pembagian pembebanan unit pembangkit paling optimum dalam rentang waktu tertentu dengan tetap memperhatikan batasan operasi dari pembangkit salah satunya yaitu *Valve Point Effect*. Metode yang digunakan pada skripsi ini adalah metode *Equilibrium Optimizer* (EO). Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2018b dengan studi kasus 5 unit generator, dan 10 unit generator dengan rentang waktu operasi pembangkit selama 24 jam. Biaya bahan bakar total yang diperoleh dari hasil simulasi untuk 5 unit generator adalah sebesar 38.071,88 \$/h dengan waktu komputasi sebesar 34,332 sekon dan untuk 10 unit generator sebesar 1.079.149,71 \$/h. dengan waktu komputasi sebesar 52,655 sekon. Hasil simulasi yang diperoleh dengan menggunakan metode EO mampu memenuhi permintaan beban yang ada dengan tetap memperhatikan batasan yang ada pada pembangkit.

Kata kunci: *dynamic economic dispatch*, *equilibrium optimizer*, biaya bahan bakar, pembangkit.

## **ABSTRACT**

### **SOLVING OF DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH USING EQUILIBRIUM OPTIMIZER (EO)**

**By**

**MANGASI YANUARDO TOGATOROP**

Electrical energy is the energy needed to support all activities and is a part of human life. As the community's economy grows, so will the demand for electricity or the load requirements for power plants. To optimize the use of fuel costs while still meeting load requirements, it can be solved by using dynamic economic dispatch (DED) analysis. This analysis is a conventional development of economic dispatch (ED), where DED is used to determine the most optimum division of loading of generating units within a certain period while still paying attention to the operating limits of the generator, one of which is the valve point effect. The method used in this thesis is the equilibrium optimizer (EO) method. The simulation was carried out using MATLAB R2018b software with a case study of 5 generator units and 10 generator units with a generator operating period of 24 hours. The total fuel cost obtained from the simulation results for 5 generator units is 38,071.88 \$/h with a computation time of 34.332 seconds, and for 10 generator units, it is 1,079,149.71 \$/h with a computation time of 52.655 seconds. The simulation results obtained using the EO method can meet the existing load demands while taking into account the existing limitations of the generator.

Keyword: dynamic economic dispatch, equilibrium optimizer, fuel costs, generator.

**PENYELESAIAN *DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH*  
MENGUNAKAN *EQUILIBRIUM OPTIMIZER (EO)***

Oleh

**MANGASI YANUARDO TOGATOROP**

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar  
**SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
2022**

Judul Skripsi : **PENYELESAIAN DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH MENGGUNAKAN EQUILIBRIUM OPTIMIZER (EO)**

Nama Mahasiswa : **Mangasi Yanuardo Togatorop**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1655031006

Jurusan : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik



**Osea Zebua, S.T., M.T.**  
NIP. 19700609 199903 1 002

**Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T.**  
NIP. 19710813 199903 1 003

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

**Herlinawati, S.T., M.T.**  
NIP. 19710314 199903 2 001

Ketua Program Studi Teknik Elektro

**Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.**  
NIP. 19740422 200012 2 001

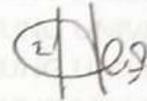
**MENGESAHKAN**

**1. Tim Penguji**

**Ketua : Osea Zebua, S.T., M.T.**



**Sekretaris : Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T.**

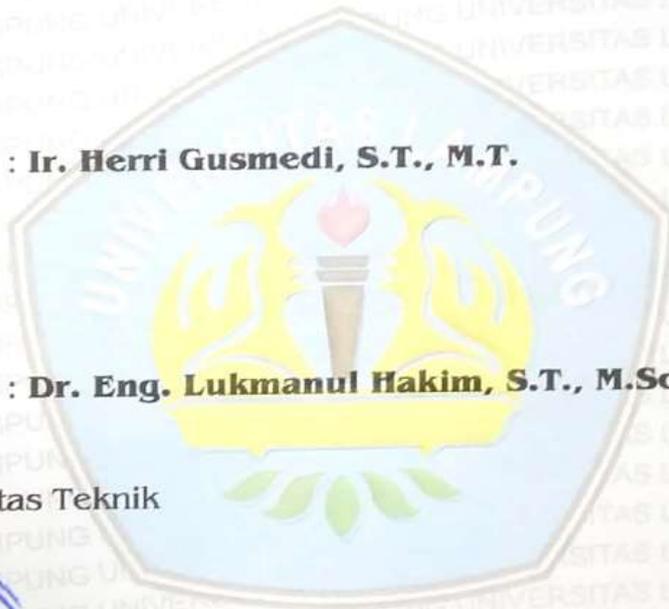
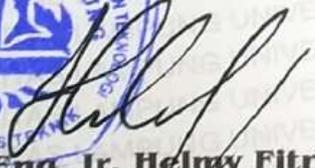


**Penguji : Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.**



**2. Dekan Fakultas Teknik**

**Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.**  
NIP. 19750928 200112 1 002



**Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 06 Desember 2022**

## SURAT PERNYATAAN

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

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

Bandar Lampung, 06 Desember 2022



Mangasi Yanuardo Togatorop  
NPM 1655031006

## RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Kotabumi, 01 Januari 1998. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Samiun Togatorop dan Ibu Hotnida Batubara. Pendidikan penulis TK Xaverius Kotabumi pada tahun 2002, SD Xaverius Kotabumi pada tahun 2004 hingga 2010, SMP Xaverius Kotabumi pada tahun 2011 hingga 2013, dan SMA Negeri 3 Kotabumi pada tahun 2013 hingga 2016.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2016 melalui jalur SIMANILA (Seleksi Mandiri Unila). Pada semester 5 penulis memilih konsentrasi Teknik Tenaga Listrik (TTL) sebagai fokus dalam perkuliahan dan penelitian. Selama menjadi mahasiswa, penulis tergabung dalam keanggotaan asisten Laboratorium Sistem Tenaga Listrik (STL) dari tahun 2018 dan berkesempatan menjadi asisten dosen mata kuliah Menggambar Teknik tahun 2018 dan 2019, serta menjadi asisten mata kuliah Praktikum Analisa Sistem Tenaga pada tahun 2020. Selain itu, penulis tergabung dalam lembaga kemahasiswaan yang ada di Jurusan Teknik Elektro (Himatro) sebagai anggota Departemen Pendidikan divisi Kerohanian pada periode 2017 serta pada Periode 2018 menjadi Anggota Departemen Komunikasi dan Informasi divisi Hubungan Masyarakat. Pada 1 Juli 2019 – 9 Agustus 2019, penulis melaksanakan kerja praktik di PT. PERTAMINA (PERSERO) RU III PLAJU- SUNGAI GERONG dengan mengangkat judul “*Online and Offline Service Inspection* pada Transformator Daya di PT PERTAMINA Refinery Unit III PLAJU-SUNGAI GERONG

# PERSEMBAHAN

*Sebuah Karya Hasil Perjuanganku .....*

*Kupersembahkan sepenuh hati kepada:*

*Tuhanku Yesus Kristus yang selalu menyertai dan membimbingku  
di saat suka dan susah. Dialah Gunung Batu Tempat  
Perlindunganku*

*Bapak dan mamaku tersayang, sebagai tanda baktiku. Terima  
kasih untuk doa, kasih sayang dan pengorbanannya*

*My Brother Kevin dan Keluarga serta kakakku tercinta Jennifer,  
yang selalu mendoakan dan memberi semangat setiap waktu*

*Para dosen di Teknik Elektro Universitas Lampung, sebagai tanda  
hormatku, terima kasih atas ilmu yang diberikan*

*Kelurga besar dari bapak dan mama (Togatorop dan Batubara),  
teman-teman seperjuangan SINS Teknik ELEktro 2016, kakak-kakak  
dan adik-adik tingkat di Teknik Elektro Universitas Lampung,*

*Alamamaterku tercinta,*

*Universitas Lampung*



## MOTTO

TUHAN itu adil dalam segala jalan-Nya dan penuh kasih setia dalam segala perbuatan-Nya. (Mazmur 145 : 17)

Kuatkan dan teguhkanlah hatimu, janganlah takut dan jangan gemetar karena mereka, sebab Tuhan Allahmu, Dialah yang berjalan menyertai engkau; Ia tidak akan membiarkan engkau dan tidak akan meninggalkan engkau. (Ulangan 31: 6)

*Life is like riding a bicycle. To Keep your balance you must to keep moving (Albert Einstein)*

*Lakukanlah Hal - hal yang mustahil sebab pesaingnya hampir tidak ada (Mangasi Togatorop)*



## SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus karena atas berkat dan kasih karunia-Nya yang luar biasa, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Penyelesaian *Dynamic Economic Dispatch* menggunakan *Equilibrium Optimizer (EO)*”** dapat diselesaikan dengan baik.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah banyak membantu selama mengerjakan tugas akhir ini. Melalui kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung
2. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku Kepala Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
3. Ibu Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T. selaku Kepala Prodi Teknik Elektro serta Dosen Pembimbing Akademik (PA) yang telah membantu penulis dalam memberikan arahan dan saran serta kritik dalam menjalani masa studi selama di Universitas Lampung.
4. Bapak Osea Zebua, S.T., M.T. selaku pembimbing utama dan telah memberikan dan membantu dalam bimbingan rutin, motivasi, arahan dan pandangan kehidupan kepada penulis di setiap kesempatan dengan baik dan ramah.
5. Bapak Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan bantuan dalam bimbingan, arahan, dan nilai-nilai kehidupan kepada penulis dengan baik dan ramah.

6. Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun kepada penulis dalam mengerjakan dan menyelesaikan skripsi ini.
7. Dr. Sri Purwiyanti, S.T., M.T selaku dosen Pembimbing Akademik (PA) yang telah memberikan bantuan, saran, arahan, maupun kritik selama menjalani masa studi di Universitas Lampung dengan baik dan ramah
8. Segenap Dosen di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat, wawasan, dan pengalaman bagi penulis.
9. Segenap Staff dan Admin di Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik yang telah membantu penulis baik dalam hal administrasi dan hal-hal lainnya.
10. Bapak dan mama yang tercinta serta abang Kevin, Kakak Yesica, Kak Jennifer, serta Ria terimakasih atas doa dan dukungan semangatnya selama mengerjakan skripsi
11. Segenap Keluarga Besar Laboratorium Sistem Tenaga Listrik; Bapak Khairudin, S.T., M.T., Pak Rachman, Pak Zul atas kerjasama dan nasehatnya selama studi; Rekan Asisten 2016 Beti, Panji, Firda, Yupida, serta Intan sebagai partner Skripsi dan Puji serta Bayu selaku peneliti di lab STL. Kakak Asisten 2014 – 2015 kak Fitra kak Fandi, kak Ferdian, kak Ibnu, kak Jeshu, bang dedi, kak Ridwan, kak Desi, kak Arief, Kak Rafi, kak Septi. Dan Adik – adik asisten 2017 – 2018 Salwa, Yoel, Naufal, Ocazy, Harbi, Redho, Danar, Naftali, Natasya, Abdul, Adrian, Aziz, Reihan, Syamil, Iqbal, Rizki, dan Ucok yang telah memberikan semangat untuk telah banyak membantu penulis.
12. Angkatan dan Letting tercinta SINS Elektro 2016 yang sudah menjadi bagian keluarga sejak maba hingga akhir terimakasih atas cerita dan dukungan dalam menjalani masa studi di kampus semoga kita selalu sukses dan jaya di darat, laut dan udara.
13. Rekan- Rekan Lab yang berkumpul di Konversi yang sudah berbagi keluh kesah serta kesenangan bersama Kak Bobby, Kak Helmi, Kak Rizki, Farhan, Aby, Rahmat, Yosa, Ramadhan, Bagawi, Syahrul, Alif, Ogy, Dendi, Nuel, Zein terimakasih atas dukungan dan semangatnya serhingga saya bisa lulus ST

14. Rekan-rekan Himatro Unila, serta kakak-kakak dan adik-adik tingkat di Jurusan Teknik Elektro
15. Seluruh teman-teman yang terlibat langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian skripsi.

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

Bandar Lampung, 27 November 2022

Mangasi Yanuardo Togatorop

## DAFTAR ISI

|   |      |
|---|------|
| DAFTAR ISI.....   | XIV  |
| DAFTAR TABEL .....  | XVI  |
| DAFTAR GAMBAR.....  | XVII |
| I. PENDAHULUAN .....  | 1    |
| 1.1 Latar Belakang.....   | 1    |
| 1.2 Tujuan Penelitian.....  | 2    |
| 1.3 Manfaat Penelitian.....   | 3    |
| 1.4 Rumusan Masalah.....  | 3    |
| 1.5 Batasan Masalah .....   | 3    |
| 1.6 Hipotesis.....  | 3    |
| 1.7 Sistematika Penulisan .....                                     | 4    |
| II. TINJAUAN PUSTAKA.....   | 5    |
| 2.1 Sistem Transmisi Listrik .....                                  | 5    |
| 2.2 Karakteristik Unit Pembangkit Thermal .....                     | 6    |
| 2.3 Karakteristik <i>Input-Output</i> .....                         | 8    |
| 2.4 <i>Economic Dispatch</i> .....                                  | 9    |
| 2.5 <i>Dynamic Economic Dispatch</i> .....                          | 10   |
| 2.6 <i>Valve Point Effect (VPE)</i> .....                           | 11   |
| 2.7 <i>Equilibrium Optimizer (EO)</i> .....                         | 12   |
| 2.7.1 Inisialisasi dan Evaluasi Fungsi.....                         | 14   |
| 2.7.2 <i>Equilibrium pool and candidates (C<sub>eq</sub>)</i> ..... | 14   |
| 2.7.3 Suku Eksponensial (F).....                                    | 15   |
| 2.7.4 Tingkat Pembangkitan.....                                     | 16   |
| 2.7.5 Particel's Memory Saving.....                                 | 20   |
| 2.7.6 Kemampuan Eksplorasi <i>Equilibrium Optimizer (EO)</i> .....  | 20   |
| 2.7.7 Kemampuan Eksploitasi <i>Equilibrium Optimizer (EO)</i> ..... | 21   |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>III. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>  | <b>22</b> |
| 3.1. Waktu dan Tempat Penelitian .....   | 22        |
| 3.2. Alat dan Bahan.....   | 22        |
| 3.3. Tahap Penelitian .....  | 23        |
| 3.4. Diagram Alir Penelitian.....  | 24        |
| 3.5. Diagram Alir Metode <i>Equilibrium Optimizer</i> .....  | 25        |
| 3.6. Simulasi <i>Dynamic Economic Dispatch</i> Menggunakan <i>Equilibrium Optimizer</i><br>26                |           |
| <b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>   | <b>29</b> |
| 4.1 Data Studi Kasus Simulasi .....  | 29        |
| 4.1.1 Studi kasus 5 unit sistem Generator .....  | 29        |
| 4.1.2 Studi kasus 10 unit sistem Generator .....   | 31        |
| 4.2 Hasil Simulasi .....   | 33        |
| 4.2.1. Hasil Simulasi 5 Unit Sistem Generator .....  | 33        |
| 4.2.2. Hasil Simulasi 10 Unit Sistem Generator .....   | 36        |
| 4.3 Analisis Statik Metode <i>Equilibrium Optimizer</i> .....  | 40        |
| 4.3.1 Analisis Statik Studi Kasus 5 Unit Sistem Generator Menggunakan<br><i>Equilibrium Optimizer</i> .....  | 41        |
| 4.3.2 Analisis Statik Studi Kasus 10 Unit Sistem Generator Menggunakan<br><i>Equilibrium Optimizer</i> ..... | 42        |
| <b>BAB V PENUTUP.....</b>  | <b>43</b> |
| 5.1 Kesimpulan .....   | 43        |
| 5.2 Saran .....  | 43        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>  | <b>44</b> |

## **DAFTAR TABEL**

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabel 3. 1</b> Penjadwalan Aktifitas Penelitian.....   | 22 |
| <b>Tabel 3.2</b> Parameter Studi Kasus 5 Unit Generator .....   | 26 |
| <b>Tabel 3. 3</b> Parameter Studi Kasus 5 Unit Generator .....  | 27 |
| <b>Tabel 4. 1</b> Batasan pembangkit dan Koefisien Pembangkit.....  | 30 |
| <b>Tabel 4. 2</b> Demand pembangkitan 5 unit generator selama 24 jam .....  | 30 |
| <b>Tabel 4.3</b> Batasan pembangkit dan Koefisien Pembangkit.....   | 31 |
| <b>Tabel 4. 4</b> Demand pembangkitan 10 unit generator selama 24 jam .....   | 32 |
| <b>Tabel 4. 5</b> Data hasil simulasi dengan optimasi EO 5 unit Generator.....  | 34 |
| <b>Tabel 4. 6</b> Data hasil simulasi dengan optimasi EO 10 unit Generator.....   | 38 |
| <b>Tabel 4. 7</b> Analisis Statik Penyelesaian Dynamic Economic Dispatch pada Sistem 5 Unit Generator Menggunakan Metode Equilibrium Optimizer .....  | 41 |
| <b>Tabel 4. 8</b> Analisis Statik Penyelesaian Dynamic Economic Dispatch pada Sistem 10 Unit Generator Menggunakan Metode Equilibrium Optimizer ..... | 42 |

## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| <b>Gambar 2. 1</b> Skema alur sistem tenaga listrik .....   | 5  |
| <b>Gambar 2. 2</b> Blok Diagram Pembangkit Thermal [3] .....  | 7  |
| <b>Gambar 2. 3</b> (a) Kurva <i>Input-Output</i> (b) Kurva Biaya Bahan Bakar [4].....   | 9  |
| <b>Gambar 2. 4</b> Kurva Biaya Bahan Bakar dengan Valve Point Effect.....   | 11 |
| <b>Gambar 2.5</b> Persentasi 1-D konsentrasi pembaruan bantuan dalam eksplorasi dan eksploitasi.....  | 18 |
| <b>Gambar 2. 6</b> Kolaborasi kandidat equilibrium dalam memperbaiki konsentrasi partikel pada 2D dimensi.....                                | 19 |
| <b>Gambar 3. 1</b> Diagram Alir Penelitian.....   | 24 |
| <b>Gambar 3. 2</b> Diagram Alir Metode Equilibrium Optimizer .....  | 25 |
| <b>Gambar 4.1</b> Grafik Simulasi Data Beban dan Tingkat Pembangkitan Generator Setiap Jamnya pada Studi Kasus 5 unit Sistem Generator.....   | 35 |
| <b>Gambar 4. 2</b> Kurva Konvergensi pada 5 Unit Sistem Generator dengan Metode Equilibrium Optimizer .....                                   | 36 |
| <b>Gambar 4. 3</b> Grafik Simulasi Data Beban dan Tingkat Pembangkitan Generator Setiap Jamnya pada Studi Kasus 10 unit Sistem Generator..... | 39 |
| <b>Gambar 4. 4</b> Kurva Konvergensi pada 10 Unit Sistem Generator dengan Metode Equilibrium Optimizer .....                                  | 40 |

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan energi yang dibutuhkan untuk menunjang segala aktivitas serta menjadi salah satu bagian dalam kehidupan manusia. Semakin meningkatnya perekonomian masyarakat maka secara otomatis kebutuhan akan tenaga listrik atau kebutuhan beban pada pembangkit listrik akan meningkat juga, tercatat kebutuhan akan energi listrik bertambah sebesar 6 % setiap tahunnya dibandingkan pertumbuhan pembangkit membuat pembangkit lebih sering beroperasi. Dalam pengoperasiannya suatu pembangkit memperhatikan beberapa hal diantaranya adalah besaran permintaan beban, rugi-rugi saluran, serta penggunaan bahan bakar salah satunya batubara.

Penggunaan bahan bakar dalam pembangkitan tenaga listrik adalah salah satu hal yang harus diperhatikan karena kurang lebih sekitar 60 % biaya suatu pembangkitan merupakan biaya bahan bakar. Pemakaian bahan bakar yang besar dapat membuat operasi pembangkit listrik menjadi tidak tepat guna, maka dari itu diperlukan pengoptimalan biaya bahan bakar, namun tetap memenuhi permintaan beban agar biaya operasi pembangkit menjadi efisien. Salah satu cara yang digunakan untuk menekan biaya bahan bakar adalah dengan menggunakan metode analisis *Economic Dispatch*. *Economic Dispatch* merupakan suatu cara untuk meminimalisir biaya operasi atau biaya bahan bakar (*fuel cost*) dengan mengatur total daya keluaran setiap unit pembangkit untuk memenuhi permintaan beban dengan tetap memenuhi batas batas operasi (*constraint*) pada setiap unit generator.

*Dynamic Economic Dispatch* (DED) adalah suatu metode optimasi dari sistem tenaga dimana analisis ini merupakan pengembangan konvensional dari *Economic Dispatch*. DED digunakan untuk menentukan pembagian pembebanan unit pembangkit yang

paling optimum secara ekonomis dalam rentang waktu tertentu dari unit pembangkit [1]

Beberapa penelitian *Economic Dispatch* Atau pun *Dynamic Economic Dispatch* yang pernah dilakukan sebelumnya dengan beberapa metode diantaranya adalah:

- *Dynamic Economic Dispatch* dengan Mempertimbangkan *Demand Response* Menggunakan *Particle Swarm Optimization* oleh Zico Musiano Sihombing (2018)
- *Dynamic Economic Dispatch* dengan Mempertimbangkan Kerugian Transmisi Menggunakan Metode *Sequential Quadratic Programming* oleh Dika Lazuardi Akbar (2016)
- *Dynamic Economic Dispatch Using Genetic and Particle Swarm Optimization Algorithm* oleh EL FERGOUGUI (2018)
- “Analisis *Economic Dispatch* Dengan Mempertimbangkan Batasan Operasi Pembangkit Menggunakan Metode *Whale Optimization Algorithm (WOA)*” oleh Mila Intan Ervina (2020)
- “*Dynamic Economic Dispatch Menggunakan Quadratic Programming*” oleh Zainal Abidin (2012)

## 1.2. Tujuan Penelitian

Penelitian pada skripsi ini bertujuan menyelesaikan permasalahan *Dynamic Economic Dispatch (DED)* serta meminimasi biaya total pembangkitan yang efisien sehingga beban dapat dipenuhi menggunakan metode *Equilibrium Optimizer*.

### 1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Dapat mengimplementasikan metode *Equilibrium Optimizer* untuk menentukan biaya pembangkitan (*fuel cost*) yang efisien serta minimum pada sistem 5 unit dan 10 unit generator
2. Menjadi salah satu alternatif penyelesaian permasalahan *Dynamic Economic Dispatch* (DED)
3. Dapat menjadi acuan bagi mahasiswa lain untuk menyempurnakan tugas akhir ini

### 1.4. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang terdapat pada penelitian ini adalah: Bagaimana menerapkan metode *Equilibrium Optimizer* untuk menyelesaikan permasalahan *Dynamic Economic Dispatch* pada sistem tenaga listrik 5 dan 10 unit generator?

### 1.5. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menggunakan pembebanan statis dimana permintaan/kebutuhan beban telah diketahui.
2. Menggunakan data sistem 5 unit dan 10 unit generator
3. Tidak memperhitungkan *Rump Rate* (RR) dan *Prohibited Operating Zone* (POZ)
4. Tidak memperhitungkan rugi-rugi saluran transmisi

### 1.6. Hipotesis

Dengan menggunakan metode *Equilibrium Optimizer* (EO), permasalahan *Dynamic Economic Dispatch* pada studi kasus 5 unit dan 10 unit generator, dapat dihasilkan total biaya pembangkitan yang lebih ekonomis.

### **1.7. Sistematika Penulisan**

Adapun sistematika penulisan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

**BAB I : PENDAHULUAN**

Berisi tentang latar belakang, tujuan penelitian, manfaat penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, hipotesis, dan sistematika penulisan.

**BAB II : TINJAUAN PUSTAKA**

Berisi tentang teori yang dapat menunjang penyusunan skripsi ini.

**BAB III : METODE PENELITIAN**

Berisi tentang waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan, dan metode yang digunakan dalam penelitian.

**BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN**

Berisi tentang hasil dan pembahasan dari penelitian yang dilakukan.

**BAB V : SIMPULAN DAN SARAN**

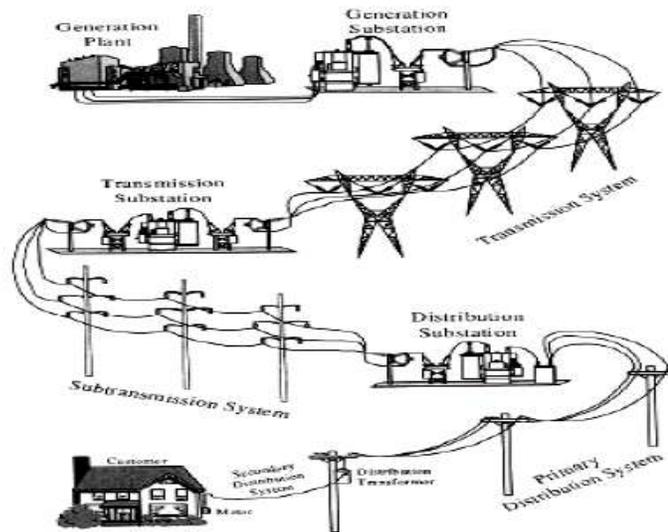
Berisi tentang kesimpulan yang didapat dari penelitian yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian selanjutnya.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Sistem Transmisi Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang berfungsi untuk menyalurkan daya dari pusat pembangkit sampai dengan ke pusat beban. Secara umum, sistem tenaga listrik terbagi menjadi tiga bagian, yakni pembangkit, transmisi dan distribusi. Energi listrik dibangkitkan pada pembangkit listrik kemudian disalurkan melalui saluran transmisi dan didistribusikan ke pusat-pusat beban

Pada gambar 2.1 ini dapat dilihat, bahwa tenaga listrik yang dihasilkan dan dikirimkan ke konsumen melalui Pusat Pembangkit Tenaga Listrik, Gardu Induk, Saluran



**Gambar 2. 1** Skema alur sistem tenaga listrik

Transmisi, Gardu Induk, Saluran Distribusi, dan kemudian ke beban (konsumen tenaga listrik).

Pada sistem tenaga listrik, jarak antara pembangkit dengan beban yang cukup jauh, akan menimbulkan adanya penurunan kualitas tegangan yang diakibatkan oleh rugi

rugi pada jaringan. Sehingga dibutuhkan suatu peralatan untuk memperbaiki kualitas tegangan dan diletakkan pada saluran yang mengalami drop tegangan. SVC (*StaticVar Compensator*) berfungsi sebagai pemelihara kestabilan kondisi *steady state* dan dinamika voltase dalam batasan yang sudah ditentukan pada jaringan transmisi berjarak jauh dan berbeban tinggi (*heavily loaded*). *Synchronous Condenser*, sebagai generator pensuplay arus gangguan, dan transformer dengan taps yang bervariasi, Ini adalah jenis khusus transformator listrik yang dapat menambah atau mengurangi powered gulungan kawat, sehingga meningkatkan atau menurunkan medan magnet dan tegangan keluaran dari transformator. [2]

Transmisi Tenaga Listrik Merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari tempat pembangkit tenaga listrik (*Power Plant*) hingga Saluran distribusi listrik (*substation distribution*) sehingga dapat disalurkan sampai pada konsumen pengguna listrik. Transmisi listrik menggunakan suatu media yang disebut dengan Saluran Transmisi untuk mentransmisikan tenaga listrik dari Generator Station/ Pembangkit Listrik sampai distribution station hingga sampai pada konsumen pengguna listrik. Tenaga listrik di transmisikan oleh suatu bahan konduktor yang mengalirkan tipe Saluran Transmisi Listrik. Penyaluran tenaga listrik pada transmisi menggunakan arus bolak-balik (AC) ataupun juga dengan arus searah (DC). Penggunaan arus bolak-balik yaitu dengan sistem tiga-fasa atau dengan empat-fasa. Saluran Transmisi di dapat dibagi menjadi 3 jenis yaitu: Saluran Udara, Saluran Kabel Bawah Tanah, serta Saluran Isolasi Gas. Sistem Transmisi juga diklasifikasikan menjadi 3 jenis berdasarkan besarnya tegangan yang di transmisikan yaitu

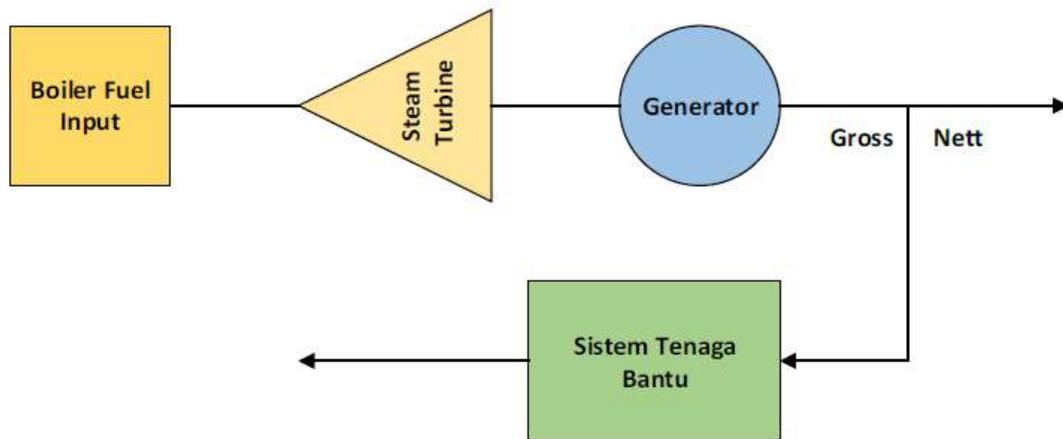
- Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 200kV-500kV
- Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 30kV-150kV
- Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 30kV-150kV [2]

## **2.2. Karakteristik Unit Pembangkit Thermal**

Karakteristik pembangkit dapat memudahkan penekanan untuk memperoleh pembiayaan bahan baku energi. Pemodelan matematis dari karakteristik pembangkit

memiliki tujuan memudahkan proses optimasi supaya diperoleh biaya pembangkitan yang ekonomis dan optimal. Menurut karakteristiknya pembangkit listrik diklasifikasikan kedalam dua bagian besar yaitu pembangkit *hydro* dan pembangkit thermal. Pembangkit thermal merupakan pembangkit yang cukup menjadi perhatian karena biaya bahan bakar yang dikonsumsi pembangkit ini tinggi serta berubah-ubah sesuai kebutuhan beban yang harus dipenuhi.[3]

Pembangkit thermal merupakan pembangkit yang menggunakan sumber energi thermal sebagai bahan bakarnya seperti PLTG, PLTGU, PLTS, PTLU dan PLTP. Pada pembangkit thermal bahan bakar yang banyak digunakan untuk mendapatkan energi panas antara lain batubara, gas, minyak dan uranium. Pembangkit sendiri mempunyai fluida kerja berbeda untuk memutar turbin sehingga menghasilkan energi mekanik yang berfungsi sebagai penggerak awal dari generator supaya menghasilkan suatu energi listrik. Skema sistem dari pembangkit thermal dapat dilihat pada gambar 2.2 [3]



**Gambar 2. 2** Blok Diagram Pembangkit Thermal [3]

Berdasarkan blok diagram dari pembangkit thermal diatas terdapa tiga bagian, yaitu boiler, turbin, dan generator. Boiler merupakan sebuah tempat untuk dihasilkannya fluida kerja pada pembangkit agar dapat memutar sudu-sudu turbin. fluida kerja dari PLTU dan PLTN adalah uap air sedangkan PLTGU dan PLTD fluida kerjanya adalah udara. Turbin merupakan penggerak awal dari generator sehingga dapat mengubah

energi dari mekanik menjadi listrik. Sistem tenaga bantu atau *auxiliary power system* adalah bagian dari pembangkit itu sendiri, seperti pompa sirkulasi air di kondensor, boiler, kipas, dan lain-lain memerlukan 2 - 6% dari daya keluaran pembangkit.

### 2.3. Karakteristik *Input-Output*

Karakteristik *Input-Output* merupakan suatu penggambaran yang memiliki hubungan input/masukan berupa bahan bakar (Kcal/h atau \$/h) yang diberikan ke setiap unit dimana menghasilkan daya keluaran sebesar MW. Input bahan bakar yang bermula *heat rate* dengan satuan *british thermal unit/hour* (Btu/h) atau *Kilocalories/hour* (Kcal/h) dapat dikonversi ke biaya bahan bakar/jam (\$/h) dengan menggunakan persamaan 2.1

$$F \frac{\text{Kcal} \times 10^6}{h} \times \frac{\$}{10^6} (\$/h) \quad (2.1)$$

Sebuah Pembangkit listrik dapat dikatakan ideal apabila kurva karakteristik dari pembangkit tersebut berbentuk linear, namun bisa juga berbentuk non linear karena keterbatasan dari masing-masing pembangkit. Pada persamaan 2.2 menjelaskan karakteristik pembangkit yang berupa *polynomial* orde dua. [4]

$$F(P_i) = H(P_i) = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (2.2)$$

$F(P_i)$  = biaya operasi setiap unit pembangkit (\$/h)

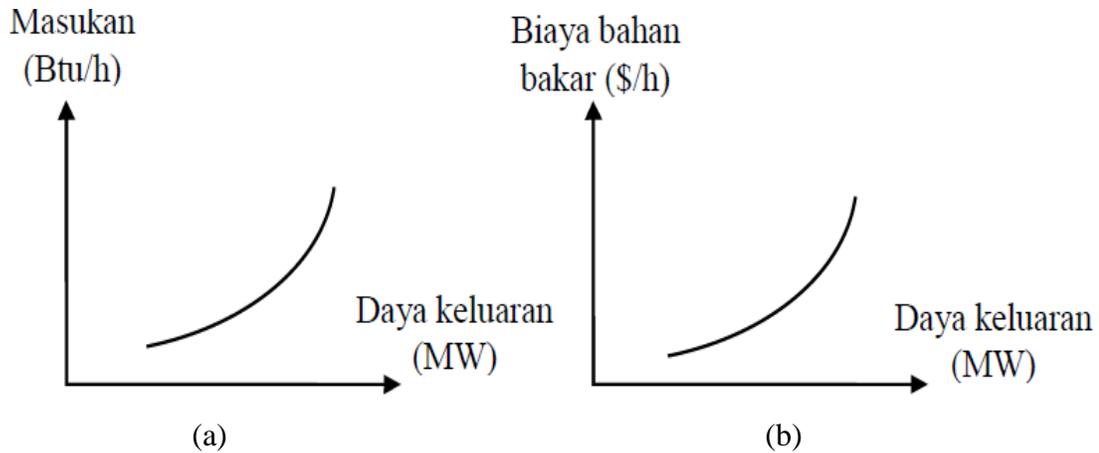
$H(P_i)$  = *heat rate* setiap unit pembangkit (Mcal/h)

$P_i$  = *output* pembangkit setiap unit (MW)

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  = koefisien setiap operasi pembangkit

$i$  = unit pembangkit ke – i

Berikut merupakan gambar 2.3 yaitu Kurva karakteristik input-output dan biaya bahan bakar



**Gambar 2. 3** (a) Kurva *Input-Output* (b) Kurva Biaya Bahan Bakar [4]

#### 2.4. *Economic Dispatch*

Pada industri tenaga listrik suatu pembangkit diharapkan memiliki biaya yang ekonomis juga efisien dalam pengoperasiannya. *Economic Dispatch* (ED) merupakan suatu metode untuk meminimkan biaya operasi atau biaya bahan bakar (*fuel cost*) dengan cara mengatur kombinasi total daya keluaran (*Output*) yang optimal dari masing-masing unit pembangkit dengan tetap mempertimbangkan Batasan – batasan dari pembangkit yang ada (*Constraints*) untuk memenuhi permintaan beban.[5]

Terdapat dua batasan dalam permasalahan *Economic Dispatch*, yaitu *equality constraint* dan *inequality constraint*. *Equality constraint* merupakan faktor eksternal dari generator untuk membangkitkan daya sesuai kebutuhan beban yang diminta. *Equality constraint* disebut juga dengan batasan kesetimbangan daya. Terdapat dua persamaan dalam batasan ini, persamaan 2.3 merupakan batasan eksternal yang mempertimbangkan rugi-rugi transmisi dan persamaan 2.4 merupakan batasan eksternal yang mengabaikan rugi-rugi transmisi.

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D + P_L \quad (2.3)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D \quad (2.4)$$

Dimana:

$P_i$  = total daya output dari pembangkit (MW).

$P_D$  = total daya yang diminta oleh beban (MW).

$P_L$  = rugi-rugi transmisi (MW).

$n$  = jumlah dari pembangkit pada suatu sistem

*Inequality constraint* merupakan faktor internal dari suatu pembangkit dimana daya yang dibangkitkan harus memenuhi batas minimum maupun maksimum dari setiap unit pembangkit. Batasan *inequality constraint* dapat ditulis dalam persamaan [5]

$$P_{Gi \min} \leq P_G \leq P_{Gi \max} \quad (2.5)$$

### 2.5. *Dynamic Economic Dispatch*

*Dynamic Economic Dispatch* (DED) merupakan suatu metode optimisasi dari sistem tenaga dimana analisis ini merupakan pengembangan metode konvensional dari *Economic Dispatch* untuk menentukan pembangkitan paling optimum dengan biaya pembangkitan yang minimum dengan memperhitungkan pembangkitan tiap waktu yang *continuous* dari setiap unit pembangkit, dengan memperhatikan parameter di dalam penyelesaiannya seperti *Ramp Rate* yang menyebabkan pembagian pembebanan satu waktu tertentu akan mempengaruhi pembagian pembebanan pada waktu lain [6] Bentuk umum fungsi objektif dari *dynamic economic dispatch* dalam satu periode tertentu di perlihatkan pada persamaan berikut

$$F_T = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N f_i(P_{it}) \quad (2.6)$$

Dimana:

$f_i P_i$  = Fungsi biaya dari generator ke -i

$P_{it}$  = Keluaran daya dari generator ke -i pada waktu  $\forall i \in \{1,2,3,\dots,n\}$  dan  $\forall t \in \{1,2,3,\dots,T\}$

## 2.6. Valve Point Effect (VPE)

*Valve Point Effect* atau efek titik katup terjadi ketika keluaran daya meningkat, dimana katup yang berfungsi sebagai pengatur uap masuk akan dibuka secara berurutan atau bertahap hingga mencapai efisiensi setinggi mungkin untuk *output* daya tertentu, sehingga fungsi biaya yang dihasilkan menjadi *non smooth* dan *non convex*. [7] *Valve Point Effect* dijelaskan secara matematis pada persamaan berikut.

$$F_i(P_{Gi}) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + |d_i \sin(e_i \times (P_{Gi}^{min} - P_{Gi}))| \quad (2.7)$$

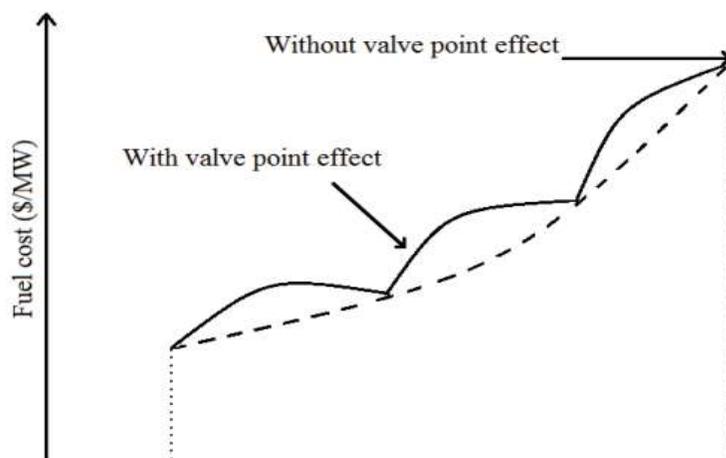
di mana

$F_i(P_{Gi})$  = Fungsi biaya bahan bakar dari unit pembangkit ke-i

$P_{Gi}$  = Keluaran daya unit pembangkit i

$a_i, b_i,$  dan  $c_i$  = Koefisien biaya,

$d_i$  dan  $e_i$  = Koefisien efek titik katup dari unit pembangkit ke-i



**Gambar 2. 4** Kurva Biaya Bahan Bakar dengan *Valve Point Effect*

Pengaruh dari *Valve Point Effect* ditunjukkan pada gambar 2.4 dimana fungsi biaya menjadi fungsi non-linier dalam orde tinggi. Sehingga untuk merepresentasikan efek riak atau *ripple* dari bukaan katup tersebut pada fungsi biaya pembangkit kuadratik ditambahkan dengan fungsi sinusoidal agar diperoleh ketepatan sebaik mungkin dalam perhitungan optimasinya. [8]

### 2.7. *Equilibrium Optimizer (EO)*

*Equilibrium Optimizer* (EO) merupakan suatu algoritma pengoptimalan baru yang termasuk kedalam jenis algoritma optimasi berbasis fisika, dimana algoritma ini berasal dari hukum fisika di alam. *Equilibrium Optimizer* terinspirasi dari model keseimbangan massa volume kontrol yang kemudian digunakan untuk memperkirakan keadaan dinamis dan ekuilibrium, dimana yang bertindak sebagai agen pencari adalah setiap partikel (solusi) dengan konsentrasinya (posisinya). Agen pencari secara acak memperbaiki konsentrasinya sampai mendapatkan solusi terbaik yang dinamakan kandidat equilibrium sehingga kemudian mencapai keadaan *equilibrium* (hasil optimal) [9]

Beberapa metode yang termasuk optimasi menggunakan hukum fisika adalah *Simulated Annealing*, yang menggunakan hukum termodinamika yang diterapkan pada pemanasan dan kemudian mengontrol pendinginan suatu material untuk meningkatkan ukuran kristalnya. *Gravitational Search Algorithm*, menggunakan hukum gravitasi Newton antara massa dan interaksinya untuk memperbaiki posisi menuju titik optimal. *Charged System Search*, memanfaatkan penggabungan aturan fisika (hukum elektrostatik Coulomb) dan mekanika (hukum mekanika Newton) untuk melakukan pengoptimalan [9]

$$V \frac{dC}{dt} = QC_{eq} - QC + G \quad (2.8)$$

C merupakan konsentrasi di dalam volume kontrol (V),  $V \frac{dC}{dt}$  adalah laju perubahan massa dalam volume kontrol, Q adalah laju aliran volumetrik dari volume kontrol,  $C_{eq}$  konsentrasi pada keadaan setimbang dimana tidak ada pembangkitan di dalam volume kontrol dan G tingkat pembangkitan massa di dalam volume kontrol. Saat  $V \frac{dC}{dt}$  mencapai nol, maka equilibrium akan mencapai keadaan yang stabil. Penataan ulang pada persamaan 2.8 di atas memungkinkan untuk memecahkan  $\frac{dC}{dt}$  sebagai fungsi  $\frac{Q}{V}$ , dimana  $\frac{Q}{V}$ , menyatakan kebalikan dari waktu diam, yang disebut dengan  $\lambda$ , atau  $\lambda = \frac{Q}{V}$ .

Kemudian persamaan di atas juga dapat di atur ulang untuk memecahkan konsentrasi dalam volume kontrol (C) sebagai fungsi waktu (t). [9]

$$\frac{dC}{\lambda C_{eq} - \lambda C + \frac{G}{V}} = dt \quad (2.9)$$

Berikut ini merupakan integrasi dari persamaan 2.9:

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{\lambda C_{eq} - \lambda C + \frac{G}{V}} = \int_{t_0}^t dt \quad (2.10)$$

Maka menghasilkan

$$C = C_{eq} + (C_0 - C_{eq})F + \frac{G}{\lambda V} (1 - F) \quad (2.11)$$

$C$  merupakan konsentrasi akhir,  $C_{eq}$  adalah konsentrasi pada keadaan seimbang,  $C_0$  adalah konsentrasi awal,  $G$  adalah *generation rate* (tingkat generasi),  $\lambda$  adalah *turnover rate*,  $V$  adalah volume, dan  $F$  adalah *exponential term* (suku eksponensial). Tiga bagian dari persamaan 2.11 memiliki efek terhadap pencarian dan pembaruan pada metode *equilibrium optimizer*. Terdapat tiga istilah pada persamaan diatas untuk menyajikan aturan pembaruan dari masing-masing partikel, dan setiap partikel memperbarui konsentrasinya melalui tiga istilah terpisah. Istilah pertama yaitu konsentrasi keseimbangan yang merupakan solusi terbaik sejauh ini yang dipilih secara acak dari pool (*equilibrium pool*). Istilah kedua dikaitkan dengan perbedaan konsentrasi antara partikel dan keadaan setimbang, yang bertindak sebagai mekanisme pencarian langsung dan istilah ini mendorong partikel untuk mencari domain secara global, bertindak sebagai penjelajah. Istilah ketiga dikaitkan dengan laju pembangkitan yang sebagian besar berperan sebagai pengeksplorasi (penyempurna solusi), terutama dengan langkah-langkah kecil meskipun terkadang berperan sebagai penjelajah. Beberapa permasalahan optimasi telah diuji coba dengan menggunakan metode *Equilibrium Optimizer* dan hasilnya pada metode ini mempunyai tingkat akurasi yang lebih baik dan konvergensi yang lebih cepat dibandingkan metode metaheuristik lainnya seperti: *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Grey Wolf Optimizer* (GWO), dan *Whale Optimization Algorithm* (WOA)[10]

### 2.7.1. Inisialisasi dan Evaluasi Fungsi

*Equilibrium Optimizer* menggunakan populasi awal untuk memulai proses pengoptimalan. Konsentrasi awal dibangun berdasarkan jumlah partikel dan dimensi dengan inisialisasi acak yang seragam di ruang pencarian sebagai berikut:

$$C_i^{awal} = C_{min} + rand_i(C_{max} - C_{min}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.12)$$

$C_i^{awal}$  adalah vektor konsentrasi awal partikel ke- $i$ ,  $C_{max}$  dan  $C_{min}$  menunjukkan nilai minimum dan maksimum untuk dimensinya,  $rand_i$  adalah vektor acak dalam interval  $[0,1]$ , dan  $n$  adalah jumlah partikel populasinya [9].

### 2.7.2. *Equilibrium pool and candidates* ( $C_{eq}$ )

Pada keadaan seimbang, EO (*Equilibrium Optimizer*) membentuk suatu vektor yaitu *Equilibrium pool* yang berisi lima kandidat equilibrium. Pada awal proses optimasi, tidak ada pengetahuan tentang keadaan keseimbangan dan hanya kandidat keseimbangan yang ditentukan untuk memberikan pola pencarian partikel. Berdasarkan eksperimen yang berbeda di bawah jenis masalah kasus yang berbeda, kandidat ini adalah empat partikel terbaik sejauh ini yang diidentifikasi selama keseluruhan proses pengoptimalan ditambah partikel lain, yang konsentrasinya adalah rata-rata aritmatika dari empat partikel yang disebutkan. Keempat kandidat ini membantu EO (*Equilibrium Optimizer*) memiliki kemampuan eksplorasi yang lebih baik, sedangkan rata-rata membantu dalam eksploitasi. Beberapa mungkin menggunakan jumlah kandidat lain (misalnya 3 atau 5), yang konsisten dengan literatur. Contohnya pada GWO menggunakan tiga kandidat terbaik (alfa, beta, dan gamma serigala) untuk memperbarui posisi serigala lainnya. Namun, menggunakan kurang dari empat kandidat akan menurunkan kinerja metode dalam fungsi multimodal dan komposisi, tetapi akan meningkatkan hasil dalam fungsi unimodal. Lebih dari empat kandidat akan mendapatkan efek sebaliknya. Kelima partikel ini dinominasikan sebagai kandidat keseimbangan dan digunakan untuk membangun sebuah vektor yang disebut kelompok keseimbangan:

$$\vec{C}_{eq,pool} = \{\vec{C}_{eq(1)}, \vec{C}_{eq(2)}, \vec{C}_{eq(3)}, \vec{C}_{eq(4)}, \vec{C}_{eq(ave)}\} \quad (2.13)$$

Setiap partikel di setiap iterasi memperbarui konsentrasinya dengan pemilihan acak di antara kandidat yang dipilih dengan probabilitas yang sama. Contohnya, pada iterasi pertama, partikel pertama memperbarui semua konsentrasinya berdasarkan  $\vec{C}_{eq(1)}$ ; kemudian, pada iterasi kedua, konsentrasinya dapat diperbarui berdasarkan  $\vec{C}_{eq(ave)}$ . Hingga akhir proses pengoptimalan, setiap partikel akan mengalami proses pembaruan dengan semua solusi kandidat menerima jumlah pembaruan yang kurang-lebih sama untuk setiap partikel.[10]

Untuk memperoleh  $\vec{C}_{eq(ave)}$  digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\vec{C}_{eq(ave)} = \left\{ \frac{\vec{C}_{Eq(1)} + \vec{C}_{Eq(2)} + \vec{C}_{Eq(3)} + \vec{C}_{Eq(4)}}{4} \right\} \quad (2.14)$$

### 2.7.3. Suku Eksponensial (F)

Suku berikutnya yang berkontribusi pada aturan pemutakhiran konsentrasi utama adalah suku eksponensial (F). Definisi yang akurat dari istilah ini akan membantu EO memiliki keseimbangan yang wajar antara eksplorasi dan eksploitasi. Karena tingkat perputaran dapat bervariasi dengan waktu dalam volume kendali nyata,  $\lambda$  diasumsikan sebagai vektor acak dalam interval [0,1].

$$\vec{F} = e^{-\vec{\lambda}(t-t_0)} \quad (2.15)$$

di mana waktu  $t$ , didefinisikan sebagai fungsi dari iterasi (Iter) dan dengan demikian berkurang dengan jumlah iterasi:

$$t = \left(1 - \frac{iter}{max_{iter}}\right)^{\left(a_2 \frac{iter}{max_{iter}}\right)} \quad (2.16)$$

di mana Iter dan  $Max_{iter}$  menyajikan arus dan jumlah maksimum iterasi, masing-masing, dan  $a_2$  adalah nilai konstan yang digunakan untuk mengelola kemampuan eksploitasi. Untuk menjamin konvergensi dengan memperlambat kecepatan pencarian seiring dengan peningkatan kemampuan eksplorasi dan eksploitasi algoritma, studi ini juga mempertimbangkan:

$$\vec{t}_0 = \frac{1}{\lambda} \ln(-a_1 \text{sign}(\vec{r} - 0,5) [1 - e^{-\vec{\lambda}t}]) + t \quad (2.17)$$

di mana  $a_1$  adalah nilai konstan yang mengontrol kemampuan eksplorasi. Semakin tinggi  $a_1$ , semakin baik kemampuan eksplorasi dan mengakibatkan kinerja eksploitasi

semakin rendah. Demikian pula semakin tinggi  $a_2$ , maka semakin baik kemampuan eksploitasi dan semakin rendah kemampuan eksplorasi. Komponen ketiga  $(\vec{r} - 0,5)$ , berpengaruh pada arah eksplorasi dan eksploitasi.  $r$  adalah vektor acak antara 0 dan 1. Untuk semua masalah yang selanjutnya diselesaikan dalam *Equilibrium Optimizer* ini,  $a_1$  dan  $a_2$  masing-masing sama dengan 2 dan 1. Konstanta ini dipilih melalui pengujian empiris dari subset fungsi pengujian. Namun, parameter ini dapat disesuaikan untuk masalah lain sesuai kebutuhan. Dari persamaan 2.16 dan 2.17 pada persamaan 2.15, maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\vec{F} = a_1 \text{sign}(\vec{r} - 0,5) \left[ e^{-\vec{\lambda}t} - 1 \right] + t \quad (2.18)$$

#### 2.7.4. Tingkat Pembangkitan

Tingkat pembangkitan adalah salah satu istilah terpenting dalam algoritma yang diusulkan untuk memberikan solusi yang tepat dengan meningkatkan fase eksploitasi. Dalam banyak aplikasi teknik, ada banyak model yang dapat digunakan untuk menyatakan laju pembangkitan sebagai fungsi waktu. Misalnya, satu model multiguna yang menggambarkan laju pembangkitan sebagai proses peluruhan eksponensial orde pertama didefinisikan sebagai:

$$\vec{G} = \vec{G}_0 e^{-\vec{k}(t-t_0)} \quad (2.19)$$

di mana  $G_0$  adalah nilai awal dan  $k$  menunjukkan konstanta peluruhan. Untuk mendapatkan pola pencarian yang lebih terkontrol dan sistematis serta untuk membatasi jumlah variabel acak. Maka persamaan laju pembangkitan adalah sebagai berikut:

$$\vec{G} = \vec{G}_0 e^{-\vec{\lambda}(t-t_0)} = \vec{G}_0 \vec{F} \quad (2.20)$$

Dengan,

$$\vec{G}_0 = \vec{GCP} = (\vec{C}_{eq} - \vec{\lambda}\vec{C}) \quad (2.21)$$

$$\vec{GCP} = \begin{cases} 0,5 r_1 & r_1 \geq GP \\ 0 & r_2 < GP \end{cases} \quad (2.22)$$

di mana  $r_1$  dan  $r_2$  adalah bilangan acak dalam  $[0,1]$  dan vektor  $GCP$  dibangun oleh pengulangan nilai yang sama yang dihasilkan dari persamaan diatas. Dalam persamaan,

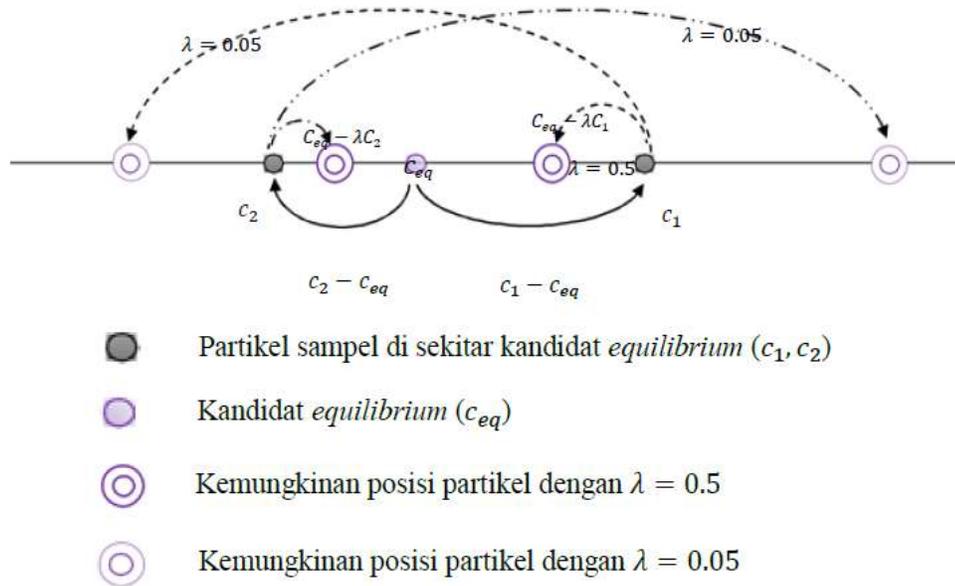
$GCP$  didefinisikan sebagai parameter kontrol laju pembangkitan, yang mencakup kemungkinan kontribusi istilah pembangkitan untuk proses pembaruan. Probabilitas kontribusi ini yang menentukan berapa banyak partikel yang menggunakan istilah generasi untuk memperbarui status mereka yang ditentukan dengan istilah lain atau disebut dengan probabilitas pembangkitan (*Generation Probability*/GP). Jika  $GCP$  adalah nol,  $G$  sama dengan nol dan semua dimensi partikel tertentu diperbarui tanpa istilah tarif pembangkitan. Keseimbangan yang baik antara eksplorasi dan eksploitasi ialah  $GP = 0,5$ . Terakhir, aturan pemutakhiran EO (*Equilibrium Optimizer*) adalah sebagai berikut:

$$\vec{C} = \vec{C}_{eq} + (\vec{C} - \vec{C}_{eq}) \cdot \vec{F} + \frac{\vec{G}}{\lambda v} (1 - \vec{F}) \quad (2.23)$$

di mana  $F$  didefinisikan pada persamaan suku eksponensial dan  $V$  dianggap sebagai unit. Persamaan diatas merupakan konsentrasi equilibrium, dimana suku kedua dan ketiga mewakili variasi konsentrasi. Istilah kedua bertanggung jawab untuk mencari ruang secara global untuk menemukan titik optimal. Istilah ini memberikan kontribusi lebih banyak untuk eksplorasi, sehingga memanfaatkan variasi konsentrasi yang besar (yaitu perbedaan langsung antara equilibrium dan partikel sampel). Ketika menemukan titik, istilah ketiga berkontribusi lebih banyak untuk membuat solusi lebih akurat, sehingga memberikan kontribusi lebih untuk eksploitasi dan keuntungan dari variasi kecil dalam konsentrasi, yang diatur oleh tingkat pembangkitan ( $G$ ). Tergantung pada parameter seperti konsentrasi partikel dan kandidat *equilibrium*, serta laju pergantian ( $\lambda$ ), suku kedua dan ketiga mungkin memiliki tanda yang sama atau berlawanan. Tanda yang sama membuat variasi menjadi besar, yang membantu untuk mencari seluruh domain dengan lebih baik dan tanda sebaliknya membuat variasi kecil, yang membantu dalam pencarian lokal.

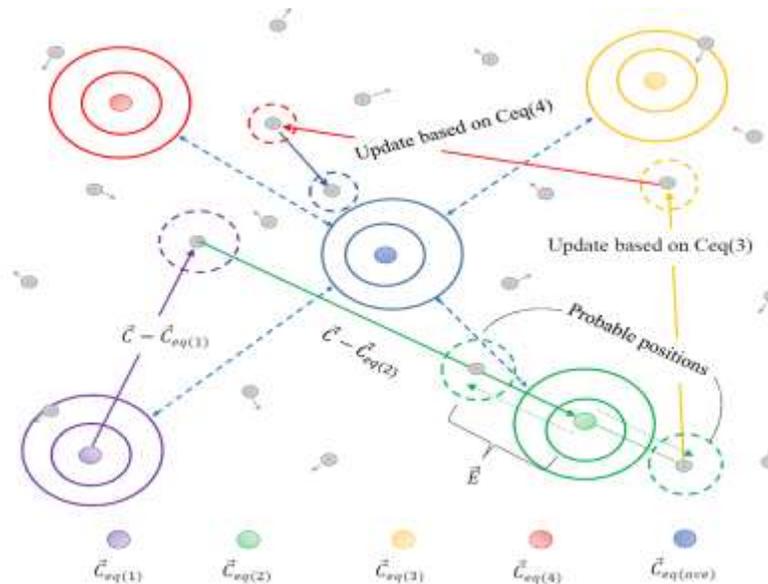
Meskipun istilah kedua mencoba menemukan solusi yang relatif jauh dari kandidat equilibrium dan istilah ketiga mencoba untuk menyempurnakan solusi lebih dekat ke kandidat, hal ini tidak selalu terjadi. Tingkat perputaran yang kecil (misalnya,  $\leq 0.05$ )

di penyebut dari istilah ketiga meningkatkan variasinya dan membantu eksplorasi di beberapa dimensi juga. [9]



**Gambar 2.5** Persentasi 1-D konsentrasi pembaruan bantuan dalam eksplorasi dan eksploitasi

Gambar 2.5 diatas menunjukkan versi 1-D tentang bagaimana istilah-istilah di atas berkontribusi pada eksplorasi dan eksploitasi.  $c_1 - c_{eq}$  mewakili istilah kedua dalam Persamaan 2.23, sementara  $c_{eq} - \lambda c_1$  mewakili suku ketiga ( $G$  adalah fungsi dari  $G_0$ ). Istilah tingkat pembangkitan (Persamaan 2.20 – 2.22) mengontrol variasi ini. Karena  $\lambda$  berubah dengan setiap perubahan dimensi, variasi besar ini hanya terjadi pada dimensi dengan nilai  $\lambda$  kecil. Hal ini penting diketahui bahwa fitur ini memiliki fungsi yang mirip dengan operator mutasi dalam algoritme evolusioner dan sangat membantu EO untuk mengeksploitasi solusi [9]



**Gambar 2. 6** Kolaborasi kandidat equilibrium dalam memperbarui konsentrasi partikel pada 2D dimensi

Gambar 2.6 menunjukkan sketsa konseptual dari gabungan semua kandidat keseimbangan pada partikel sampel dan bagaimana pengaruhnya terhadap pembaruan konsentrasi, satu demi satu, dalam algoritme yang diusulkan. Karena posisi topologi kandidat equilibrium beragam dalam iterasi awal, dan istilah eksponensial menghasilkan bilangan acak yang besar, proses pembaruan langkah demi langkah ini membantu partikel menutupi seluruh domain dalam pencarian mereka. Skenario sebaliknya terjadi pada iterasi terakhir, ketika kandidat mengelilingi titik optimal dengan konfigurasi serupa. Pada saat inilah, istilah eksponensial menghasilkan bilangan acak kecil, yang membantu dalam menyempurnakan solusi dengan memberikan ukuran langkah yang lebih kecil. Konsep ini juga bisa diperluas ke dimensi yang lebih tinggi sebagai *hyperspace* di mana konsentrasinya akan diperbarui dengan pergerakan partikel dalam ruang dimensi- $n$ . Pada metode *equilibrium optimizer* suku eksponensial (*Exponential term/F*) dan tingkat pembangkitan (*generation rate/G*) memegang peranan penting dalam eksplorasi dan eksploitasi selama proses *update* konsentrasi [9]

### 2.7.5. Particel's Memory Saving

Menambahkan prosedur penghematan memori membantu setiap partikel dalam melacak koordinatnya di ruang, yang juga menginformasikan nilai kesesuaiannya. Mekanisme ini menyerupai konsep pbest di PSO. Nilai kesesuaian setiap partikel dalam iterasi saat ini dibandingkan dengan iterasi sebelumnya dan akan ditimpa jika kesesuaiannya lebih baik. Mekanisme ini membantu dalam kemampuan eksploitasi tetapi dapat meningkatkan kemungkinan terjebak dalam minimum lokal jika metode tersebut tidak mendapatkan keuntungan dari kemampuan eksplorasi global [9]

### 2.7.6. Kemampuan Eksplorasi *Equilibrium Optimizer* (EO)

Berikut ini beberapa parameter dan mekanisme dalam *Equilibrium Optimizer* (EO) yang mengarah pada eksplorasi:

- $a_1$ : mengontrol kuantitas eksplorasi (*magnitude*) dari algoritma. Ini menentukan seberapa jauh posisi baru yang akan menjadi kandidat equilibrium dimana semakin tinggi nilai  $a_1$  maka semakin tinggi pula kemampuan eksplorasinya. Perhatikan bahwa angka yang lebih besar dari tiga akan menurunkan kinerja eksplorasinya. Karena  $a_1$  dapat memperbesar variasi konsentrasi, maka harus cukup besar untuk memperluas kemampuan eksplorasi. Tetapi, berdasarkan pengujian empiris, ditemukan bahwa nilai yang lebih besar dari tiga mendorong agen mencari batas. Rekomendasi ini mirip dengan rekomendasi parameter bebas di algoritma lain. Contohnya, dalam PSO direkomendasikan bahwa jumlah parameter sosial harus kurang dari atau sama dengan empat. [9]
- $sign(r-0,5)$ : mengontrol arah eksplorasi. Karena  $r$  ada di  $[0,1]$  dengan distribusi, ada kemungkinan yang sama dari  $sign$  negatif dan positif
- Probabilitas pembangkitan (GP): mengontrol probabilitas partisipasi konsentrasi memperbarui dengan tingkat pembangkitan.  $GP = 1$  berarti tidak ada istilah laju pembangkitan yang berpartisipasi dalam proses optimasi. Keadaan ini menekankan kemampuan eksplorasi yang tinggi eksplorasi yang tinggi, dan sering kali mengarah pada solusi yang tidak akurat.  $GP = 0$  berarti

bahwa suku laju pembangkitan akan selalu berpartisipasi dalam proses, yang meningkatkan kemungkinan suku laju pembangkitan terhenti pada optima lokal. Berdasarkan pengujian empiris,  $GP = 0,5$  memberikan keseimbangan yang baik antara fase eksplorasi dan eksploitasi

- *Equilibrium pool*: vektor ini terdiri dari lima partikel. Pemilihan lima partikel agak sewenang-wenang tetapi dipilih berdasarkan pengujian empiris. Pada iterasi awal, semua kandidat saling berjauhan. Memperbarui konsentrasi berdasarkan kandidat ini meningkatkan kemampuan algoritma untuk mencari ruang secara global. Partikel rata-rata juga membantu menemukan ruang pencarian yang tidak diketahui pada iterasi awal ketika partikel saling berjauhan [9]

#### **2.7.7. Kemampuan Eksploitasi *Equilibrium Optimizer* (EO)**

Dibawah ini merupakan parameter dan mekanisme utama untuk melakukan eksploitasi dan pencarian lokal di *Equilibrium Optimizer* (EO):

- $a_2$ : parameter ini mirip dengan  $a_1$ , tetapi untuk mengontrol eksploitasi. ini menentukan kuantitas (magnitude) eksploitasi dengan menggali di sekitar solusi terbaik
- $sign(r-0,5)$ : mengontrol kualitas eksploitasi (arah). Ini menentukan arah pencarian local [9]
- *Memory saving*: penghematan memori, menyimpan sejumlah partikel terbaik sejauh ini dan menggantikannya dengan partikel yang lebih buruk. Fitur ini secara langsung meningkatkan kemampuan *Equilibrium Optimizer* untuk melakukan optimasi
- *Equilibrium pool*: dengan selang iterasi, eksplorasi memudar dan eksploitasi memudar. Dengan demikian, pada iterasi terakhir dimana kandidat equilibrium dekat satu sama yang lain., proses pembaruan konsentrasi akan membantu pencarian lokal di sekitar kandidat, yang mengarah ke eksploitasi [9].

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun waktu dan tempat dalam pelaksanaan penelitian serta penjadwalan aktifitas penelitian yang ditunjukkan pada tabel 3.1 adalah sebagai berikut.

Waktu : Juni 2022 – November 2022.

Tempat : Laboratorium Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung

**Tabel 3. 1** Penjadwalan Aktifitas Penelitian

| No | Jenis Kegiatan               | Bulan ke- |   |   |   |   |   |
|----|------------------------------|-----------|---|---|---|---|---|
|    |                              | 1         | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1  | Studi literatur              | ■         | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| 2  | Pencarian data               |           | ■ | ■ |   |   |   |
| 3  | Konsep pembuatan program     |           | ■ |   |   |   |   |
| 4  | Pembuatan Program            |           | ■ | ■ |   |   |   |
| 5  | Pengujian Program            |           |   | ■ | ■ |   |   |
| 6  | Analisa hasil penelitian     |           |   |   | ■ | ■ |   |
| 7  | Penulisan laporan penelitian |           |   |   |   | ■ | ■ |

#### 3.2. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Laptop ASUS Intel Core i5 dengan sistem Windows 10 untuk simulasi dan penyusunan laporan skripsi.
2. Software Matlab R2018b untuk simulasi dalam menghasilkan daya output setiap unit generator.
3. Data sistem 5 dan 10 unit sistem Generator beserta *fuel cost* setiap unit generator sebagai bahan penelitian ini.

### 3.3. Tahap Penelitian

Adapun tahapan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

#### 1. Studi Literatur

Studi literatur ini berkaitan dengan penelitian yang akan dibahas dimana materi tersebut diambil dari beberapa referensi, seperti buku, jurnal, maupun skripsi yang berkaitan dengan penelitian.

#### 2. Studi Bimbingan

Dalam studi bimbingan ini penulis melakukan diskusi dan tanya jawab kepada dosen pembimbing untuk menambah wawasan dan menyelesaikan perihal kendala yang terjadi dalam penelitian.

#### 3. Pengambilan dan Pengolahan Data

Dalam penelitian ini pengambilan dan pengolahan data berdasarkan sistem data 5 dan 10 unit sistem Generator dimana telah diketahui parameter-parameter yang akan diambil sesuai dengan permasalahan yang akan dibahas. Kemudian data-data tersebut akan diolah menggunakan program yang telah dibuat dengan metode *Equilibrium Optimizer* untuk mendapatkan hasil yang diharapkan.

#### 4. Simulasi

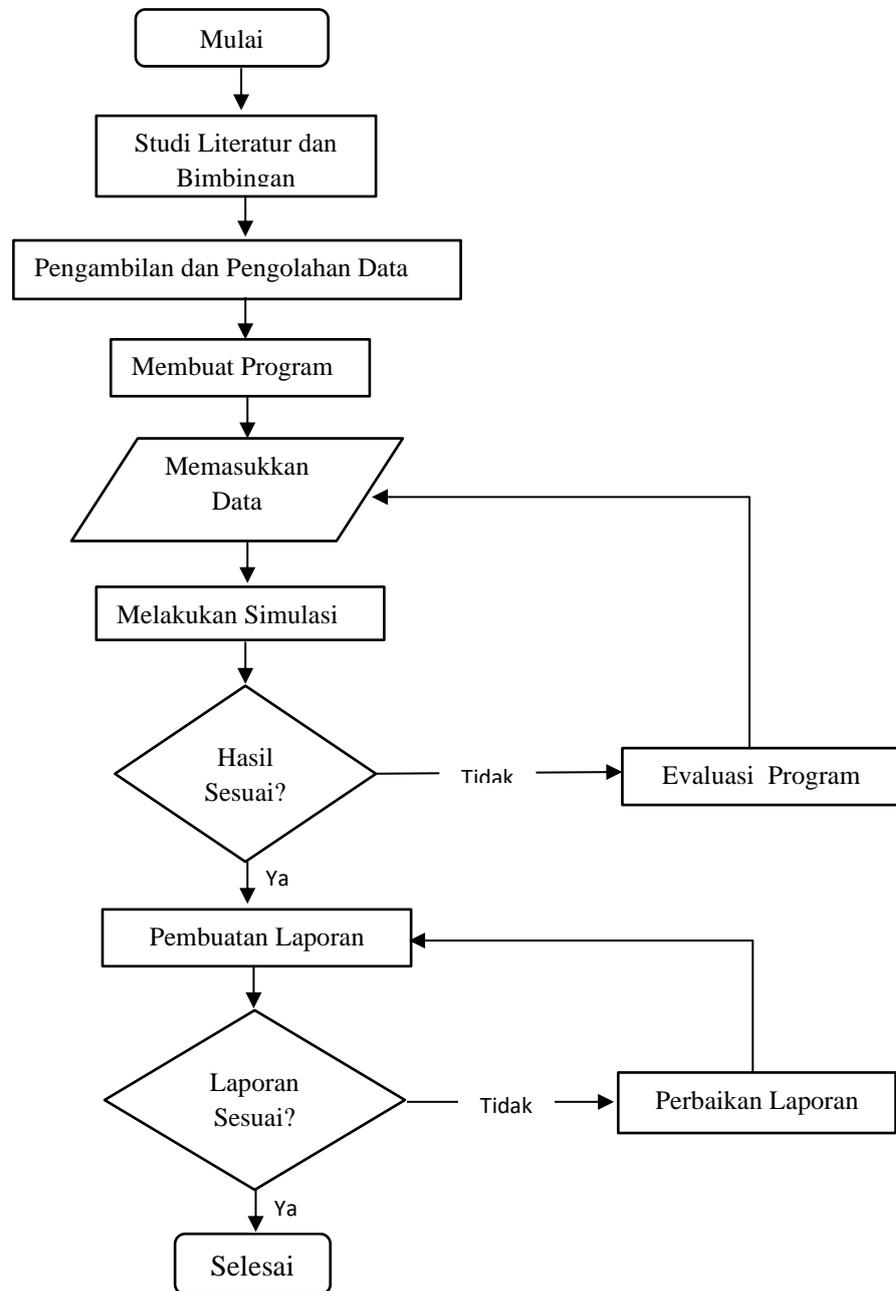
Dalam mendapatkan tujuan yang diinginkan dalam penelitian ini, dilakukan pemrograman komputer menggunakan *software* MATLAB R2018b dimana memasukkan parameter-parameter yang ada dan melakukan pemodelan sesuai metode *Equilibrium Optimizer*

#### 5. Pembuatan Laporan

Pembuatan laporan ini berguna untuk memaparkan rancangan dan hasil dari penelitian yang telah dilakukan. Laporan ini terdiri dari laporan usul yang pembuatannya dilakukan sebelum penelitian, kemudian laporan hasil yang merupakan hasil dan kesimpulan dari penelitian yang dilakukan.

### 3.4. Diagram Alir Penelitian

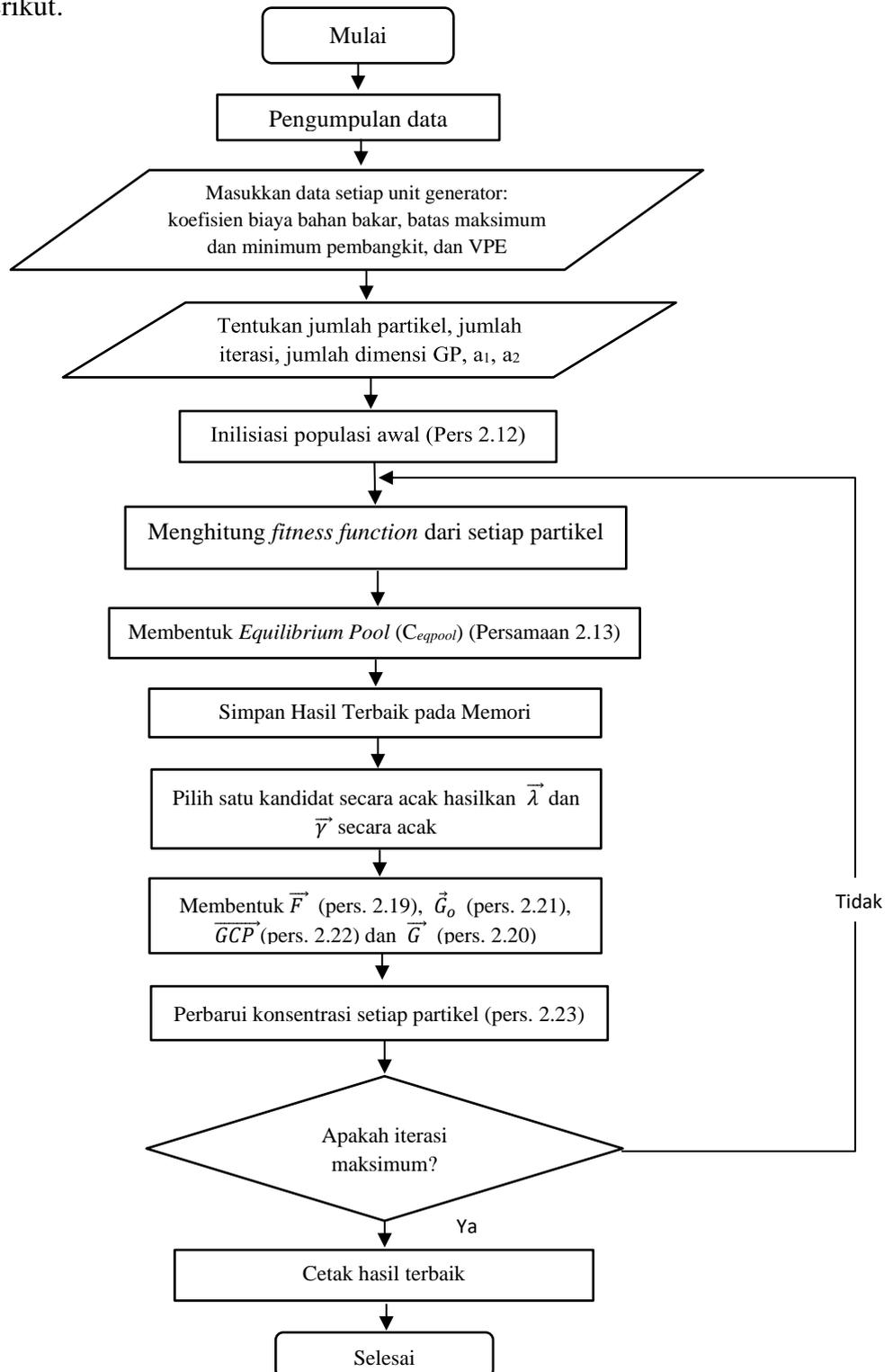
Adapun diagram alir dari penelitian ini adalah sebagai berikut.



**Gambar 3. 1** Diagram Alir Penelitian

### 3.5. Diagram Alir Metode *Equilibrium Optimizer*

Adapun diagram alir dari metode *Equilibrium Optimizer* pada penelitian ini adalah sebagai berikut.



**Gambar 3. 2** Diagram Alir Metode *Equilibrium Optimizer*

### 3.6. Simulasi *Dynamic Economic Dispatch* Menggunakan *Equilibrium Optimizer*

Berdasarkan fungsi objektif dari permasalahan *economic dispatch* yaitu meminimalkan total biaya bahan bakar pada pembangkitan, maka teknik optimasi yang digunakan pada penelitian ini adalah metode *Equilibrium Optimizer* sehingga didapatkan nilai dan posisi terbaik (konsentrasi). Berikut merupakan langkah-langkah metode *Equilibrium Optimizer* (EO) dalam menyelesaikan permasalahan *economic dispatch*.

1. Memasukkan data kasus 5 unit generator, dan 10 unit generator, yaitu koefisien biaya bahan bakar, batas maksimum ( $P_{max}$ ) dan minimum pembangkit ( $P_{min}$ ) serta koefisien efek titik katup (*Valve Point Effect/VPE*).
2. Menentukan parameter kontrol, yaitu jumlah partikel, jumlah iterasi, jumlah dimensi, nilai *Generation Probability* (GP), nilai  $a_1$  dan  $a_2$ .
  - Kasus 1 5 Unit System Generator dengan mempertimbangkan VPE

**Tabel 3.2** Parameter Studi Kasus 5 Unit Generator

| No | Parameter EO                                      |       | Nilai |
|----|---|-------|-------|
| 1  | Jumlah Dimensi                                    |       | 120   |
| 2  | Batas atas keluaran daya generator ( $P_{max}$ )  | $P_1$ | 75    |
|    |   | $P_2$ | 125   |
|    |   | $P_3$ | 175   |
|    |   | $P_4$ | 250   |
|    |   | $P_5$ | 300   |
| 3  | Batas bawah keluaran daya generator ( $P_{min}$ ) | $P_1$ | 10    |
|    |   | $P_2$ | 20    |
|    |   | $P_3$ | 30    |
|    |   | $P_4$ | 40    |
|    |   | $P_5$ | 50    |
| 4  | Jumlah Iterasi ( $Iter_{max}$ )                   |       | 500   |
| 5  | Jumlah Partikel                                   |       | 50    |
| 6  | Nilai GP  |       | 0,7   |
| 7  | $a_1$   |       | 2     |
| 8  | $a_2$   |       | 1     |

- Kasus 2 : 10 Unit System Generator dengan mempertimbangkan VPE

**Tabel 3. 3** Parameter Studi Kasus 5 Unit Generator

| No | Parameter EO   | Nilai (MW) |     |
|----|--|------------|-----|
| 1  | Jumlah Dimensi                                       | 240        |     |
| 2  | Batas atas keluaran daya generator<br>( $P_{max}$ )  | $P_1$      | 470 |
|    |  | $P_2$      | 460 |
|    |  | $P_3$      | 340 |
|    |  | $P_4$      | 300 |
|    |  | $P_5$      | 243 |
|    |  | $P_6$      | 160 |
|    |  | $P_7$      | 130 |
|    |  | $P_8$      | 120 |
|    |  | $P_9$      | 80  |
|    |  | $P_{10}$   | 55  |
| 3  | Batas bawah keluaran daya generator<br>( $P_{min}$ ) | $P_1$      | 150 |
|    |  | $P_2$      | 135 |
|    |  | $P_3$      | 73  |
|    |  | $P_4$      | 60  |
|    |  | $P_5$      | 73  |
|    |  | $P_6$      | 57  |
|    |  | $P_7$      | 20  |
|    |  | $P_8$      | 47  |
|    |  | $P_9$      | 20  |
|    |  | $P_{10}$   | 55  |
| 4  | Jumlah Iterasi ( $Iter_{max}$ )                      | 500        |     |
| 5  | Jumlah Partikel                                      | 50         |     |
| 6  | Nilai GP   | 0,7        |     |
| 7  | $a_1$  | 2          |     |
| 8  | $a_2$  | 1          |     |

3. Membuat populasi awal.
4. Menghitung fungsi objektif (*fitness function*) dari setiap partikel.
5. Membentuk *equilibrium pool* ( $C_{eq,pool}$ ) dan kandidat *equilibrium*. Simpan hasil terbaik pada *memory saving*.
6. Memilih satu kandidat secara acak dari *equilibrium pool* ( $C_{eq,pool}$ ) untuk setiap partikel. Hasilkan nilai  $\vec{\lambda}$  (*turnover rate*) dan bilangan  $\vec{r}$  secara acak.
7. Membentuk  $\vec{F}$  (suku eksponensial),  $\vec{G}_o$  (tingkat pembangkitan awal),  $\overline{GCP}$  (parameter kontrol pembangkitan) dan  $\vec{G}$  (tingkat pembangkitan).
8. Memperbarui konsentrasi setiap partikel.
9. Apabila nilai iterasi lebih kecil dari nilai iterasi maksimum, naikkan nilai iterasi menjadi  $iter = iter + 1$  dan mengulangi langkah 4 sampai 9. Jika tidak, cetak hasil terbaik (nilai *fitness* dan konsentrasi partikel).

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis pada penelitian “Penyelesaian *Dynamic Economic Dispatch* dengan menggunakan *Equilibrium Optimizer (EO)*” dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Metode *Equilibrium Optimizer* dapat meminimalkan biaya bahan bakar pada permasalahan *dynamic economic dispatch* dengan mempertimbangkan *Valve Point Effect (VPE)*.
2. Pada permasalahan *Dynamic Economic Dispatch* menggunakan *Equilibrium Optimizer (EO)*, metode ini dapat mengoptimalkan biaya bahan bakar pembangkit dengan tetap mempertahankan batasan minimum maupun maksimum serta batasan VPE pada pembangkit untuk studi kasus 5 unit generator dan 10 unit generator dalam periode waktu 24 jam
3. Dari hasil optimasi dengan 10 kali pengujian menggunakan metode *Equilibrium Optimizer* didapatkan biaya bahan bakar dalam rentang waktu 24 jam yaitu sebesar 38.071,88 \$/h dengan waktu komputasi 29,623 s untuk studi kasus 5 unit generator dan 1.079.149,71 \$/h dengan waktu komputasi 60,979 s untuk studi kasus 10 unit generator

### 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, adapun saran yang dapat penulis berikan adalah sebagai berikut :

1. Pengembangan penyelesaian *dynamic economic dispatch* selanjutnya dapat membahas kondisi *ramp rate*, *ramp down*, *prohibited operation zone* serta rugi-rugi transmisi yang terjadi pada masa pembangkitan
2. Analisis penyelesaian *dynamic economic dispatch* dapat dilakukan menggunakan metode lainnya agar mendapatkan total biaya bahan bakar yang lebih minimum

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. C. Kumar, T. Alwarsamy.” *Dynamic Economic Dispatch – A Review of Solution Methodologies*”, *European Journal of Scientific Research*, vol. 64, no. 4, pp. 517-537, 2011.
- [2]. Pramono Joko, Buwono Montario Candra, Zamrudi.2010. “Makalah Teknik Tenaga Listrik *Transmission of Electrical Energy* (Transmisi Tenaga Listrik)”. Depok. Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia
- [3]. Gumelar, Girgio Rendra. “Dynamic Economic Dispatch Mempertimbangkan Prohibited Operating Zones Menggunakan Algoritma Improved Artificial Bee Colony”. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017
- [4]. Nabila, Hana. “Analisis Economic Dispatch Pada PLTU Sektor Bukit Asam Menggunakan Metode Iterasi Lambda dan *Dynamic Programming*”. Bandar Lampung: Universitas Lampung, 2017
- [5]. Ervina. Mila Intan. “Analisis *Economic Dispatch* Dengan Mempertimbangkan Batasan Operasi Pembangkit Menggunakan Metode *Whale Optimazation Algorithm* (WOA)”. Lampung. Universitas Lampung, 2020
- [6]. Wirakusuma, Fakhruddin. “*Dynamic Economic Dispatch* Pada Sistem Kelistrikan Microgrid Dengan Penambahan Media Penyimpan Energi Menggunakan *Quadratic Programming*”. Surabaya.Institut Teknologi

Sepuluh November. JURNAL TEKNIK ITS Vol. 5, No. 2, (2016) ISSN:  
2337-3539

- [7]. Wati, Trisna. “*Hybrid QP-PSO For Solving Economic Dispatch with Valve Point Effect*”. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember. 2017
- [8]. Wibowo R S, Anwar I dan Soeprijanto A. “Aliran Daya Optimal Mempertimbangkan Efek Katub Bahan Bakar di Sistem Jawa Bali 500 kV Menggunakan metode PSO”. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember. 2014
- [9]. A. Faramarzi, M. Heidarinejad, B. Stephens, and S. Mirjalili, “*Equilibrium Optimizer: A Novel Optimization Algorithm*,” *Knowledge-Based Syst.*, vol. 191, 2020, doi: 10.1016/j.knosys.2019.105190.
- [10]. Osea Zebua, I Made Ginarsa dan I Made Ari N, “Penyelesaian Masalah *Economic Dispatch* Menggunakan *Equilibrium Optimizer*”, *Jurnal Teknik Elektro*, Vol: 13, No. 1, Juni 2021
- [11]. Santra Dipankar, Mukherjee Krishna, and Mondal Subrata. “*Dynamic Economic Dispatch using hybrid Metaheuristics*”. *Journal of Electrical System and Information Technology* 7:3. 2020