

SKRIPSI

**ANALISIS *ECONOMIC DISPATCH* UNIT PEMBANGKIT
TERMAL PLTU PUNAGAYA DENGAN METODE
*DIFFERENTIAL EVOLUTION***

Disusun dan diajukan oleh:

**PONNO SAMPE
D041 20 1063**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**ANALISIS *ECONOMIC DISPATCH* UNIT PEMBANGKIT
TERMAL PLTU PUNAGAYA DENGAN METODE
*DIFFERENTIAL EVOLUTION***

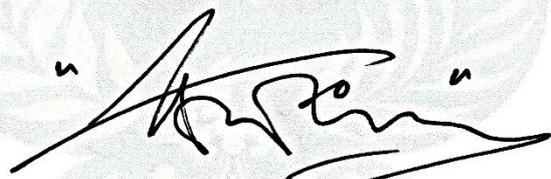
Disusun dan diajukan oleh

**Ponno Sampe
D041201063**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 8 Agustus 2024
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Prof. Ir. M. Bachtiar Nappu, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D.
NIP. 19760406 200312 1 002

Ketua Program Studi,



Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., IPM.
NIP. 19691026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ponno Sampe
NIM : D041201063
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

ANALISIS *ECONOMIC DISPATCH* UNIT PEMBANGKIT TERMAL PLTU PUNAGAYA DENGAN METODE *DIFFERENTIAL EVOLUTION*

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 5 Agustus 2024

Yang menyatakan



Ponno Sampe

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul **“Analisis *Economic Dispatch* Unit Pembangkit Termal PLTU Punagaya dengan Metode *Diferential Evolution*”** ditulis sesuai kemampuan dan pengetahuan yang dimiliki penulis. Penulis sangat mengharapkan agar penelitian ini dapat bermanfaat dan dapat berguna untuk menambah pengetahuan kita.

Tepat terselesaikannya skripsi yang penulis buat, penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan doa dari orang-orang yang banyak membantu penulis baik itu dukungan secara langsung maupun tidak langsung. Ucapan terima kasih ini penulis sampaikan kepada :

1. Tuhan Yang Maha Esa adalah Tuhan yang telah menciptakan langit dan bumi serta segala isinya, berkat pemeliharaan-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Orang tua tercinta Ayahanda dan Ibunda (Bapak Marthen, Bapak M.P. Patakin, Ibu Tabita, dan Ibu Maria), serta keluarga besar yang selalu menjadi penyemangat penulis, sebagai sandaran terkuat yang tanpa henti memberikan kasih sayang dengan penuh cinta, selalu memberikan motivasi dan selalu menjadi pendengar setiap keluh kesah penulis.
3. Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
4. Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin.
5. Prof. Ir. Muhammad Bachtiar Nappu, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D., selaku pembimbing yang telah mengorbankan pikiran, tenaga dan waktunya dalam memberikan bimbingan serta pengarahan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
6. Prof. Ir. Ardiaty Arief, S.T., M.TM., Ph.D. dan Dr. Ir. Sri Mawar Said, M.T., selaku penguji yang telah memberikan waktunya untuk menguji penelitian ini dan turut serta memberikan saran dan masukan pada tugas akhir ini.
7. Seluruh dosen dan sivitas akademika Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin yang dengan penuh kasih dan kesabaran mengajar dan mengarahkan penulis selama menempuh pendidikan S1.

8. Bapak Tri Pria Nugraha selaku Manager UPK Punagaya dan jajarannya yang telah mengizinkan penulis melakukan penelitian di PLTU Punagaya.
9. Bapak Bachrul Ulum Ramadhan selaku pembimbing penulis selama pengambilan data di PLTU Punagaya yang telah banyak meluangkan waktunya untuk mengajar dan membantu penulis dalam penyelesaian penelitian ini.
10. Teman-teman seperjuangan Teknik Elektro 2020 (PROCEZ20R) yang menemani perjuangan penulis selama kuliah, berbagi ilmu dan pengetahuannya, banyak suka duka yang dilalui bersama.
11. Teman-teman RG Energi, Sistem Tenaga, dan Pemasaran angkatan 2020 terkhusus Febe, Muflih, dan Salsah yang selalu berbagi suka dan duka serta membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
12. Teman-teman kerja praktik UP2D Makassar (Anderson, Arthur, Febe, dan Jorgio) yang telah membantu dan menemani penulis selama kerja praktik di UP2D Makassar.
13. Teman-teman KKNT 110 Universitas Hasanuddin di desa wisata Lembang Parinding (Angel, Edgar, Noriko, Riry, Sepri, Tria, dan Wina) yang berjuang bersama penulis mengabdikan diri kurang lebih dua bulan di Lembang Parinding, dan sampai saat ini terus membangun hubungan yang baik.
14. Seluruh teman dan seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu dan memberikan dukungan penuh dalam penyusunan skripsi ini.

Penulis sangat menyadari banyaknya kekurangan dan keterbatasan dalam skripsi ini. Sehingga diharapkan agar bisa mendapatkan kritik dan saran yang membangun untuk menjadi bahan evaluasi ke depannya.

ABSTRAK

PONNO SAMPE. *Analisis Economic Dispatch Unit Pembangkit Termal PLTU Punagaya dengan Metode Differential Evolution* (dibimbing oleh Muhammad Bachtiar Nappu)

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring peningkatan pembangunan dan kemajuan teknologi. Pada tahun 2023 sistem kelistrikan Sulbagsel memiliki total daya mampu pembangkit 2589,21 MW dengan perkiraan beban puncak 1820,98 MW. Daya listrik yang dihasilkan pembangkit yang ada di sistem Sulbagsel didominasi PLTU (sekitar 39% dari daya yang dibangkitkan menggunakan bahan bakar batubara). Salah satu pusat pembangkit di kelistrikan Sulsebar adalah PLTU Punagaya dengan kapasitas 2 x 100 MW yang berada di Desa Punagaya, Kecamatan Bangkala, Kabupaten Jeneponto. Biaya bahan bakar merupakan biaya terbesar dalam pengoperasian pembangkit sehingga pusat pembangkit harus mengelola pembangkitannya dengan baik melalui *economic dispatch* sehingga semua beban tetap terpenuhi dan perusahaan tidak mengalami kerugian. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengoperasian ekonomis pada PLTU Punagaya dengan menggunakan metode *differential evolution* (DE) yang akan dibandingkan dengan pengoperasian *real*. Metode DE dipilih karena kemampuannya dalam mengoptimalkan penggunaan bahan bakar dengan mempertimbangkan variasi dalam operasi pembangkit. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, hasil optimasi DE menunjukkan bahwa secara umum hasil optimasi DE lebih ekonomis daripada operasi *real*. Pada beban maksimum dan minimum dapat menghemat biaya sebesar Rp. 703.059,28. Pada beban hari libur 3 Desember 2023 dapat menghemat biaya sebesar Rp. 48.655.347,00. Pada beban hari kerja 7 Desember 2023 dapat menghemat biaya sebesar Rp. 32.389.424,72. Pada beban rata-rata harian selama 21 hari juga menunjukkan penghematan biaya harian sebesar Rp. 19.867.284,81. Dalam 21 hari optimasi DE, total biaya bahan bakar yang dapat dihemat sebesar Rp. 470.362.715,13. Hasil optimasi dari 499 data beban PLTU Punagaya (1 Desember-21 Desember 2023) memiliki persentase keberhasilan 79,96% yang menunjukkan metode *differential evolution* dan fungsi karakteristik yang dibentuk dari bulan November 2023 dapat digunakan untuk *economic dispatch* PLTU Punagaya.

Kata kunci: *Economic Dispatch*, *Differential Evolution*, PLTU Punagaya.

ABSTRACT

PONNO SAMPE. *Economic Dispatch Analysis of Thermal Power Plant Units at PLTU Punagaya using the Differential Evolution Method* (supervised by Muhammad Bachtiar Nappu)

The demand for electricity continues to increase in line with development and technological advancements. In 2023, the Sulbagsel electrical system had a total generating capacity of 2589.21 MW with an estimated peak load of 1820.98 MW. The electricity generated by the existing plants in the Sulbagsel system is predominantly from coal-fired power plants (around 39% of the generated power uses coal as fuel). One of the power generation centers in the Sulselbar electrical system is PLTU Punagaya, with a capacity of 2 x 100 MW, located in Punagaya Village, Bangkala District, Jeneponto Regency. Fuel costs are the largest expense in plant operations, so the power plant must manage its operations well through economic dispatch to ensure that all loads are met and the company does not incur losses. This study aims to analyze the economic operation of PLTU Punagaya using the differential evolution (DE) method, which will be compared with real operations. The DE method was chosen for its ability to optimize fuel use by considering variations in plant operations. Based on the research conducted, DE optimization results showed that DE optimization is generally more economical than real operations. At maximum and minimum loads, costs can be reduced by Rp. 703,059.28. On the holiday load of December 3, 2023, costs can be reduced by Rp. 48,655,347.00. On the working day load of December 7, 2023, costs can be reduced by Rp. 32,389,424.72. The daily average load over 21 days also showed a daily cost savings of Rp. 19,867,284.81. Over 21 days of DE optimization, the total fuel cost savings amounted to Rp. 470,362,715.13. Optimization results from 499 load data points at PLTU Punagaya (December 1–December 21, 2023) with a success rate of 79.96% indicate that the differential evolution method and the characteristic functions formed in November 2023 can be used for the economic dispatch of PLTU Punagaya.

Keywords: Economic Dispatch, Differential Evolution, PLTU Punagaya.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Sistem Tenaga Listrik	6
2.2 Pembangkit Tenaga Listrik	7
2.2.1 Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU)	8
2.2.2 Komponen-komponen PLTU	9
2.2.3 Prinsip kerja PLTU	10
2.2.4 Karakteristik input-output PLTU	11
2.2.5 Karakteristik kenaikan biaya	11
2.3 Optimasi Unit Pembangkit Listrik	13
2.3.1 Pengaturan penjadwalan ekonomis (<i>unit commitment</i>)	13
2.3.2 Pengaturan unit pembangkit (<i>economic dispatch</i>)	14
2.4 Fungsi Biaya Bahan Bakar dari Persamaan Karakteristik Input-Output	14
2.5 Perhitungan Persamaan Karakteristik Input Output	16
2.6 Batasan dalam Pembangkitan Tenaga Listrik	17
2.7 Metode Lagrange	18
2.8 Metode <i>Differential Evolution</i>	20
2.9 MATLAB	24
2.10 State of the Art	25
BAB III METODE PENELITIAN	31

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	31
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	31
3.3 Teknik Pengumpulan Data	31
3.4 Alur Penelitian.....	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1 Gambaran Umum Kabupaten Jenepono dan PLTU Punagaya.....	37
4.1.1 Gambaran umum Kabupaten Jenepono	37
4.1.2 Gambaran umum PLTU Punagaya.....	40
4.2 Data PLTU Punagaya	42
4.2.1 Data kapasitas unit pembangkit	42
4.2.2 Data beban PLTU Punagaya	42
4.2.3 Data input-ouput unit pembangkit	45
4.3 Fungsi Karakteristik Input Output Unit Pembangkit PLTU Punagaya	47
4.4 Fungsi Biaya Bahan Bakar	48
4.5 Optimasi Biaya Bahan Bakar	51
4.5.1 Parameter <i>differential evolution</i>	51
4.5.2 Validasi program metode <i>differential evolution</i> dengan metode Lagrange	52
4.5.3 Hasil optimasi biaya bahan bakar	54
4.6 Perbandingan Biaya Bahan Bakar Operasi <i>Real</i> dan Optimasi DE	63
4.6.1 Perbandingan operasi <i>real</i> dan optimasi DE pada beban minimum dan maksimum	64
4.6.2 Perbandingan operasi <i>real</i> dan optimasi DE pada akhir pekan dan hari libur.....	66
4.6.3 Perbandingan operasi <i>real</i> dan optimasi DE pada hari kerja	72
4.6.4 Perbandingan operasi <i>real</i> dan optimasi DE pada beban rata-rata harian bulan Desember 2023	76
4.7 Pembagian Beban Rata-rata dan Perbandingannya dengan Kondisi Beban <i>Real</i> dan Hasil Optimasi DE	80
4.8 Efektifitas Metode DE dan Fungsi Karakteristik	83
BAB V KESIMPULAN.....	86
5.1 Kesimpulan.....	86
5.2 Saran.....	87
DAFTAR PUSTAKA.....	88
LAMPIRAN.....	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Sistem tenaga listrik	6
Gambar 2 Proses konversi energi pada PLTU.....	8
Gambar 3 Grafik dari persamaan biaya kenaikan biaya bahan bakar	12
Gambar 4 Diagram alir metode DE	21
Gambar 5 Pembangkitan populasi DE	22
Gambar 6 Mutasi DE	23
Gambar 7 Diagram alir penelitian.....	33
Gambar 8 Diagram alir metode <i>differential evolution</i>	35
Gambar 9 Peta administrasi Kabupaten Jeneponto	37
Gambar 10 Peta administrasi Desa Punagaya	39
Gambar 11 PLTU Punagaya.....	40
Gambar 12 Tata letak PLTU Punagaya	41
Gambar 13 Grafik kurva beban perjam 3, 7, dan 10 Desember 2023.....	44
Gambar 14 Grafik kurva beban rata-rata, beban maksimum, dan beban minimum perhari bulan Desember 2023	45
Gambar 15 Grafik sebaran data input-output unit 1 bulan November 2023.....	46
Gambar 16 Grafik sebaran data input-output unit 2 bulan November 2023.....	46
Gambar 17 Grafik karakteristik input-output unit 1	47
Gambar 18 Grafik karakteristik input-output unit 2	48
Gambar 19 Grafik fungsi biaya bahan bakar	49
Gambar 20 Grafik kenaikan biaya bahan bakar	50
Gambar 21 Grafik pembebanan unit 1 dan 2, serta total biaya bahan bakar pada beban maksimum dan minimum	55
Gambar 22 Grafik pembebanan unit 1 dan unit 2, serta biaya bahan bakar pada 3 Desember 2023.....	57
Gambar 23 Grafik pembebanan unit 1 dan unit 2, serta biaya bahan bakar pada 10 Desember 2023.....	59
Gambar 24 Grafik pembebanan unit 1 dan unit 2, serta biaya bahan bakar pada 7 Desember 2023.....	61
Gambar 25 Grafik pembebanan unit 1 dan unit 2, serta biaya bahan bakar pada beban rata-rata harian Desember 2023	63
Gambar 26 Grafik perbandingan biaya operasi <i>real</i> beban minimum dan beban maksimum	65
Gambar 27 Grafik perbandingan biaya operasi <i>real</i> dengan hasil optimasi pada hari libur 3 Desember 2023	68
Gambar 28 Grafik perbandingan pembebanan operasi <i>real</i> dengan hasil optimasi pada hari libur 3 Desember 2023	69
Gambar 29 Grafik perbandingan biaya operasi <i>real</i> dengan hasil optimasi pada hari libur 10 Desember 2023	71
Gambar 30 Grafik perbandingan pembebanan operasi <i>real</i> dengan hasil optimasi pada akhir pekan dan hari libur 10 Desember 2023	72
Gambar 31 Grafik perbandingan biaya operasi <i>real</i> dengan hasil optimasi pada hari libur 7 Desember 2023	74
Gambar 32 Grafik perbandingan pembebanan operasi <i>real</i> dengan hasil optimasi pada hari kerja 7 Desember 2023	75

Gambar 33 Grafik perbandingan biaya operasi <i>real</i> dengan hasil optimasi beban rata-rata harian Desember 2023	78
Gambar 34 Grafik pembebanan pada setiap unit PLTU operasi <i>real</i> dan setelah optimasi beban rata-rata harian Desember 2023	79
Gambar 35 Perbandingan biaya pembebanan rata-rata dengan biaya operasi <i>real</i> dan biaya setelah optimasi 20 Desember 2023	82

DAFTAR TABEL

Tabel 1 State of the art	26
Tabel 2 Data kapasitas pembangkit PLTU Punagaya.....	42
Tabel 3 Data beban 1-7 Desember 2023	43
Tabel 4 Koefisien karakteristik input output setiap unit-unit pembangkit PLTU Punagaya	48
Tabel 5 Parameter <i>differential evolution</i>	51
Tabel 6 Validasi metode DE dengan metode Lagrange.....	53
Tabel 7 Hasil optimasi beban minimum dan beban maksimum Desember 2023 .	54
Tabel 8 Hasil optimasi pada akhir pekan dan hari libur 3 Desember 2023.....	56
Tabel 9 Hasil optimasi pada akhir pekan dan hari libur 10 Desember 2023.....	58
Tabel 10 Hasil optimasi pada hari kerja tanggal 7 Desember 2023	60
Tabel 11 Hasil optimasi beban rata-rata harian Desember 2023.....	62
Tabel 12 Perbandingan operasi <i>real</i> beban minimum dan beban maksimum Desember 2023.....	65
Tabel 13 Perbandingan operasi <i>real</i> dengan hasil optimasi pada hari libur 3 Desember 2023.....	67
Tabel 14 Perbandingan operasi <i>real</i> dengan hasil optimasi pada hari libur 10 Desember 202.....	70
Tabel 15 Perbandingan operasi <i>real</i> dengan hasil optimasi pada hari kerja 7 Desember 2023.....	73
Tabel 16 Perbandingan operasi <i>real</i> dengan hasil optimasi beban rata-rata harian Desember 2023.....	77
Tabel 17 Perbandingan biaya pembebanan rata-rata dengan biaya operasi <i>real</i> dan biaya hasil optimasi DE.....	81
Tabel 18 Efektivitas <i>economic dispatch</i> menggunakan metode DE pada PLTU Punagaya	83

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Populasi manusia yang terus bertambah dan pembangunan infrastruktur yang pesat meningkatkan kebutuhan energi listrik. Selain itu, perkembangan dan kemajuan teknologi menyebabkan peningkatan kebutuhan energi listrik. PLN mencatat pada tahun 2022 konsumsi energi listrik Sulselrabar mencapai 9,54 terawatt-hour (tWh) dengan jumlah pelanggan sebanyak 3.703.574 (Wardyah, 2023). Kebutuhan energi listrik yang semakin tinggi akan meningkatkan daya yang disuplai dari suatu pembangkit sehingga bahan bakar yang digunakan juga akan semakin banyak yang menyebabkan biaya bahan bakar semakin tinggi.

Sistem Sulbagsel tahun 2023 memiliki total daya mampu pembangkit sebesar 2589,21 MW dengan perkiraan beban puncak 1820,98 MW. Daya listrik yang dihasilkan pembangkit yang ada di sistem Sulbagsel masih didominasi PLTU dimana sekitar 39% dari daya yang dibangkitkan menggunakan bahan bakar batubara, 33% menggunakan air, 12% menggunakan gas alam, 10% menggunakan bahan bakar minyak, dan 6% berasal dari energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin (PLN UIP3B Sulawesi, 2023). Dalam pengoperasian tenaga listrik, bahan bakar adalah komponen terbesar dari biaya pembangkitan energi listrik dan menjadi aspek yang harus diperhatikan dalam mengoperasikan pembangkit. Menurut data statistik PLN 2023, beban usaha pembangkit rata-rata per kWh di Indonesia paling murah dihasilkan oleh pembangkit jenis PLTA sebesar Rp. 464,50 / kWh. Pembangkit PLTU merupakan pembangkit kedua termurah dengan beban usaha rata-rata sebesar Rp. 786,88 / kWh dimana biaya bahan bakarnya sebesar Rp. 532,27 / kWh. Sedangkan PLTD merupakan jenis pembangkit termahal dengan beban usaha rata-rata sebesar Rp. 8.748,35 / kWh dimana biaya bahan bakarnya sebesar Rp. 7.388,85 / kWh (PT PLN, 2023).

Salah satu pusat pembangkit yang ada di kelistrikan Sulselbar yang berkontribusi menyuplai kebutuhan beban adalah PLTU Punagaya dengan kapasitas 2 x 100 MW yang berada di Desa Punagaya, Kecamatan Bangkala, Kabupaten Jeneponto. PLTU ini menggunakan bahan bakar batubara untuk memanaskan boiler. Kebutuhan beban yang terus meningkat dan harga bahan bakar

yang meningkat serta ketersediaan batubara sebagai sumber energi tidak terbarukan mengharuskan pusat pembangkit PLTU yang ada harus mengelola pembangkitnya dengan bijak agar semua beban tetap terpenuhi dan perusahaan tidak mengalami kerugian karena biaya operasional yang tinggi.

Dalam menyediakan daya untuk beban tertentu, fokus diberikan pada perhitungan berapa banyak daya yang harus dihasilkan oleh setiap unit pembangkit agar tercapai distribusi daya yang ekonomis, yang sering disebut sebagai *economic dispatch* (ED). Istilah *economic dispatch* mengacu pada modifikasi yang bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan bahan bakar. Fungsi ED adalah untuk menentukan alokasi daya yang paling ideal di antara unit pembangkit termal. Alokasi daya yang ideal ini digunakan untuk melayani beban total sehingga biaya operasi total dapat diminimalkan. ED adalah komponen utama dari kelompok operasi sistem tenaga untuk mengidentifikasi unit komitmen, aliran beban, dan kemampuan transfer yang tersedia.

Salah satu metode optimasi yang dapat digunakan untuk penyelesaian masalah *economic dispatch* adalah metode *differential evolution* (DE). Algoritma *differential evolution* diperkenalkan oleh Storn dan Price pada tahun 1995 merupakan model optimasi yang terinspirasi dari evolusi biologis. Melalui beberapa iterasi, DE mempertahankan individu yang cocok dengan lingkungan. Namun, dibandingkan dengan algoritma evolusi lainnya, DE mempertahankan strategi pencarian global berdasarkan populasi, mengadopsi pemrograman bilangan *real*, menggunakan operasi mutasi sederhana berdasarkan perbedaan, dan strategi kelangsungan hidup satu lawan satu, yang mengurangi kompleksitas operasi genetik. Konsep utama dari algoritma DE adalah memulai dari kelompok awal yang dibangkitkan secara acak, menggunakan vektor perbedaan dari dua individu yang dipilih secara acak dari populasi sebagai dasar perubahan acak pada individu ketiga, dan memberikan bobot pada vektor perbedaan sesuai dengan aturan tertentu. Penjumlahan dengan individu ketiga menciptakan individu baru. Operasi ini disebut mutasi. Kemudian, individu mutan dicampur dengan individu target yang telah ditentukan sebelumnya untuk menghasilkan individu uji, dan proses ini disebut *crossover*. Jika nilai kecocokan individu uji lebih baik daripada nilai kecocokan individu target, individu uji akan menggantikan individu target dalam

generasi berikutnya. Jika tidak, individu target tetap dipertahankan. Operasi ini disebut seleksi. Dalam proses evolusi setiap generasi, setiap vektor individu digunakan sebagai individu target sekali, dan algoritma ini mempertahankan individu yang baik sambil menghilangkan individu yang kurang baik melalui perhitungan iterasi yang berkelanjutan, dan mengarahkan proses pencarian menuju solusi optimal global (Zheng dan Wu, 2023).

Oleh karena itu, penulis melakukan penelitian tugas akhir yang berjudul “Analisis *Economic Dispatch* Unit Pembangkit Termal PLTU Punagaya dengan Metode *Differential Evolution*” yang diharapkan dapat menjadi referensi untuk mengoptimalkan biaya bahan bakar pembangkitan (*economic dispatch*).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana menentukan biaya bahan bakar yang optimal dalam pengoperasian ekonomis PLTU Punagaya menggunakan metode *differential evolution* (DE)?
2. Bagaimana perbandingan biaya bahan bakar dalam pengoperasian ekonomis PLTU Punagaya antara metode *differential evolution* (DE) dengan data operasi *real* unit PLTU Punagaya?
3. Bagaimana efektifitas metode *differential evolution* (DE) dalam pengoperasian ekonomis PLTU Punagaya?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk menentukan biaya bahan bakar yang optimal dalam pengoperasian ekonomis PLTU Punagaya dengan menerapkan metode *differential evolution* (DE).
2. Mengevaluasi perbandingan biaya bahan bakar dalam pengoperasian ekonomis PLTU Punagaya antara metode *differential evolution* (DE) dengan data *real* unit PLTU Punagaya.
3. Menguji efektifitas metode *differential evolution* (DE) dalam pengoperasian ekonomis PLTU Punagaya.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebagai referensi mengenai pengoperasian ekonomis yang optimal pada suatu unit pembangkit.
2. Memberikan referensi mengenai penerapan metode *differential evolution* dalam pengoperasian ekonomis pembangkit listrik termal.
3. Sebagai bahan perbandingan akademisi maupun praktisi dalam perencanaan optimasi operasi pembangkit listrik termal secara ekonomis.
4. Menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan pengoperasian ekonomis pembangkit listrik termal.

1.5 Batasan Masalah

Untuk menghindari permasalahan yang terlalu luas maka penelitian ini dibatasi pada batasan sebagai berikut:

1. Penelitian ini memperhitungkan biaya bahan bakar ekonomis untuk pengoperasian ekonomis pembangkit.
2. Data input-output yang digunakan untuk optimasi ekonomis pembangkit menggunakan data *real* bulan November 2024 dari PLTU Punagaya.
3. Metode yang digunakan dalam penyelesaian permasalahan yaitu metode *differential evolution* (DE) yang disimulasikan menggunakan software MATLAB.
4. Metode untuk validasi menggunakan metode konvensional (Langrange).
5. Penelitian ini tidak memperhitungkan rugi-rugi jaringan dan emisi karbon.

1.6 Sistematika Penulisan

Berikut merupakan sistematika penulisan tugas akhir pada penelitian ini:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas terkait materi-materi yang berhubungan dengan penelitian, materi tersebut diambil dari berbagai referensi.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini membahas tentang waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan yang digunakan, teknik pengumpulan data, dan tahapan dalam melakukan penelitian.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang data penelitian, hasil simulasi penelitian, perbandingan penelitian dengan operasi *real* PLTU Punagaya, dan efektivitas metode *differential evolution* dalam *economic dispatch* PLTU Punagaya.

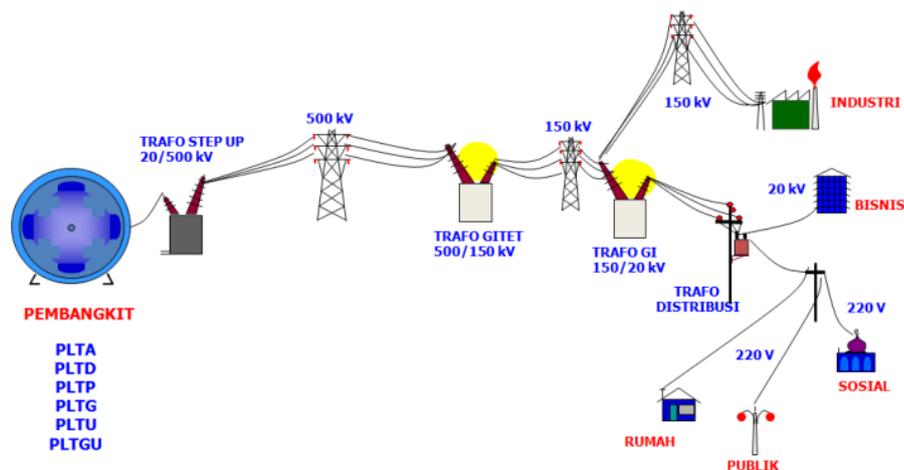
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini membahas tentang kesimpulan dari penelitian dan saran-saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang disusun dari beberapa bagian berupa pembangkit, transmisi, distribusi, dan beban yang saling terhubung membentuk suatu kerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik dari pelanggan sesuai kebutuhan (Suripto, 2017). Gambar 1 berikut menggambarkan sistem tenaga listrik secara umum.



Gambar 1 Sistem tenaga listrik
(Suripto, 2017)

Fungsi dari komponen-komponen dalam sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut: (Suripto, 2017)

a. Pembangkit Tenaga Listrik

Unit pembangkit listrik terdiri dari generator yang digerakkan turbin untuk menghasilkan listrik. Fungsinya adalah mengubah energi primer dari berbagai sumber seperti air, batu bara, panas bumi, atau minyak bumi menjadi energi listrik. Pada sistem pembangkitan, level tegangan disesuaikan dengan spesifikasi dan kapasitas generator pembangkit yang digunakan, biasanya berkisar antara 4,5 s/d 24 kV.

b. Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Bagian sistem tenaga listrik yang berupa jalur konduktor yang diletakkan di antara sumber pembangkit dan gardu induk pusat beban atau antar gardu induk disebut saluran transmisi. Fungsinya adalah untuk mengalirkan daya atau energi listrik dari pusat pembangkitan menuju gardu induk pusat beban atau antar gardu induk. Tegangan saluran transmisi umumnya berkisar antara 70 kV s/d 1000 kV.

c. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Jaringan distribusi listrik adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang terdiri dari penghantar yang ditempatkan dari gardu induk hingga area tempat pelanggan. Fungsinya adalah mendistribusikan energi listrik dari gardu induk pusat beban ke lokasi konsumen atau pelanggan listrik. Level tegangan jaringan distribusi yang sering digunakan ada dua macam, yaitu jaringan tegangan menengah (JTM) 20 kV dan jaringan tegangan rendah (JTR) 380/220 V.

d. Beban

Beban listrik merupakan peralatan listrik di lokasi konsumen yang memanfaatkan energi listrik dari sistem tenaga. Level tegangan beban konsumen menyesuaikan dengan jenis bebannya, misalnya beban industri yang biasanya memerlukan daya yang relatif besar biasanya menggunakan tegangan menengah 20 kV, sedang beban rumah tangga dengan daya yang relatif kecil, biasanya menggunakan tegangan rendah 380/220 V.

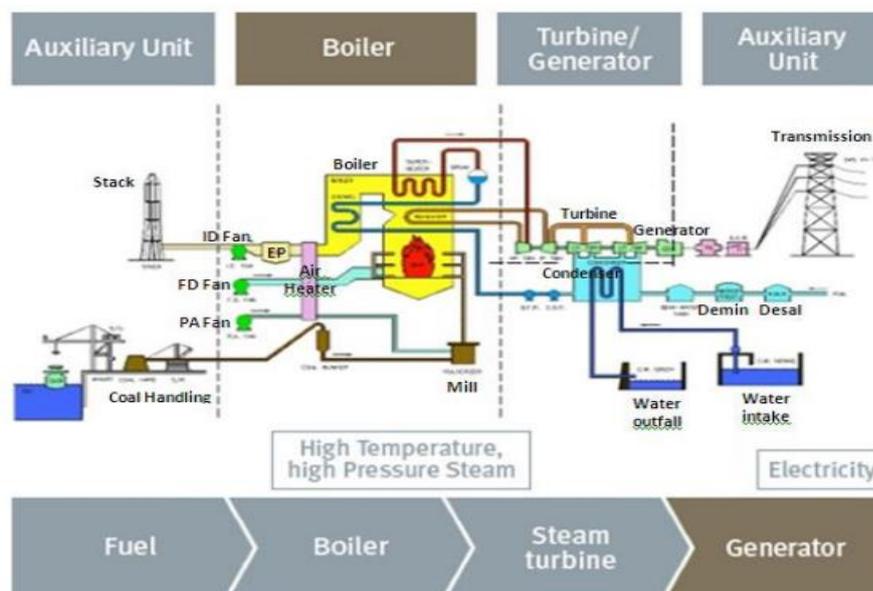
2.2 Pembangkit Tenaga Listrik

Pusat pembangkit listrik adalah tempat menghasilkan energi listrik, yang secara sederhana terdiri dari turbin sebagai penggerak mula (*primer mover*) dan generator sebagai penghasil energi listrik dengan mengkonversi energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik. Energi mekanik diperoleh dari sumber energi primer yang dapat berupa air, bahan bakar minyak, batubara, angin, surya dan lain-lain. Suatu unit pembangkit paling tidak terdiri dari tiga komponen berupa penggerak mula, generator, dan gardu induk. Masing-masing pembangkit memiliki karakteristik dan sifat yang berbeda-beda, sehingga penggunaannya disesuaikan dengan kepentingannya (Suripto, 2014).

Pusat pembangkit tenaga listrik dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu konvensional dan non-konvensional. Pembangkit konvensional mencakup Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dan Pembangkit Listrik Tenaga Termal (PLTT). Pembangkit tenaga termal mencakup Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), dan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Di sisi lain, pembangkit tenaga listrik non-konvensional meliputi Pembangkit Listrik Tenaga Angin, Pembangkit Listrik Tenaga Matahari, Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut Air Laut, *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC), *Magneto Hydro Dynamic* (MHD), dan lain sebagainya (Purnomo, 2016).

2.2.1 Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU)

PLTU adalah jenis pembangkit listrik tenaga termal yang banyak digunakan, karena efisiensinya tinggi sehingga menghasilkan energi listrik yang ekonomis. PLTU merupakan mesin konversi energi yang mengubah energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi listrik. Pusat listrik tenaga uap menggunakan bahan bakar berupa batu bara, minyak, atau gas sebagai sumber energi utama (Zuhal, 2000). Proses konversi energi pada PLTU dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Proses konversi energi pada PLTU
(Murdani dkk., 2014)

Proses konversi energi pada PLTU berlangsung melalui 3 tahapan (Murdani dkk., 2014), yaitu:

1. Pertama, energi kimia dalam bahan bakar diubah menjadi energi panas dalam bentuk uap bertekanan dan temperatur tinggi.
2. Kedua, energi panas (uap) diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran.
3. Ketiga, energi mekanik diubah menjadi energi listrik.

2.2.2 Komponen-komponen PLTU

Beberapa komponen yang terdapat pada PLTU (Murdani dkk., 2014) , yaitu:

1. Boiler

Boiler merupakan komponen yang mengubah air (*feed water*) menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*) yang akan memutar turbin uap. Perubahan dari fase cair (air) menjadi gas (uap) berlangsung melalui panas yang didapatkan dari pembakaran bahan bakar. Proses perubahan air menjadi uap terjadi dengan memanaskan air yang berada di dalam pipa-pipa dengan memanfaatkan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran dilakukan secara kontinyu di dalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar. Uap yang dihasilkan boiler adalah uap superheat dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Jumlah produksi uap tergantung pada luas permukaan pemindah panas, laju aliran, dan panas pembakaran yang diberikan. Boiler yang konstruksinya terdiri dari pipa-pipa berisi air disebut dengan *water tube boiler* (boiler pipa air).

2. Turbin Uap

Turbin uap berfungsi untuk mengubah energi panas yang terkandung dalam uap menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran. Uap dengan tekanan dan temperatur tinggi mengalir melalui nosel sehingga kecepatannya naik dan mengarah dengan tepat untuk mendorong sudu-sudu turbin yang dipasang pada poros. Akibatnya poros turbin bergerak menghasilkan putaran (energi mekanik). Uap yang telah melakukan kerja di turbin tekanan dan temperatur turun hingga kondisinya menjadi uap basah. Uap keluar turbin ini kemudian dialirkan kedalam kondensor untuk didinginkan agar menjadi air kondensat, sedangkan tenaga putar yang dihasilkan digunakan untuk memutar generator.

3. Kondensator

Kondensator adalah peralatan yang berfungsi untuk mengubah uap menjadi air. Proses perubahannya dilakukan dengan cara mengalirkan uap ke dalam suatu ruangan yang berisi pipa-pipa (*tubes*). Uap mengalir di luar pipa-pipa (*shell side*) sedangkan air sebagai pendingin mengalir di dalam pipa-pipa (*tube side*). Kondensator seperti ini disebut kondensator tipe *surface* (permukaan). Kebutuhan air untuk pendingin di kondensator sangat besar sehingga dalam perencanaan biasanya sudah diperhitungkan. Air pendingin diambil dari sumber yang cukup persediannya, yaitu dari danau, sungai atau laut. Posisi kondensator umumnya terletak dibawah turbin sehingga memudahkan aliran uap keluar turbin untuk masuk kondensator karena gravitasi.

4. Generator

Generator berfungsi mengubah energi putar dari turbin menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Generator sinkron merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik dengan cara mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi mekanik diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (*prime mover*), sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya

2.2.3 Prinsip kerja PLTU

PLTU menggunakan fluida kerja air uap yang bersirkulasi secara tertutup. Siklus tertutup artinya menggunakan fluida yang sama secara berulang-ulang. Urutan sirkulasinya secara singkat adalah sebagai berikut: Pertama air diisikan ke boiler hingga mengisi penuh seluruh luas permukaan pemindah panas. Di dalam boiler air ini dipanaskan dengan gas panas hasil pembakaran bahan bakar dengan udara sehingga berubah menjadi uap. Kedua, uap hasil produksi boiler dengan tekanan dan temperatur tertentu diarahkan untuk memutar turbin sehingga menghasilkan daya mekanik berupa putaran. Ketiga, generator yang dikopel dengan turbin berputar menghasilkan energi listrik sebagai hasil dari perputaran medan magnet dalam kumparan, sehingga ketika turbin berputar dihasilkan energi listrik dari terminal output generator. Keempat, Uap bekas keluar turbin masuk ke

kondensor untuk didinginkan dengan air pendingin agar berubah kembali menjadi air yang disebut air kondensat. Air kondensat hasil kondensasi uap kemudian digunakan lagi sebagai air pengisi boiler. Demikian siklus ini berlangsung terus menerus dan berulang-ulang (Murdani dkk., 2014).

2.2.4 Karakteristik input-output PLTU

Salah satu parameter penting pengoperasian secara ekonomis adalah karakteristik masukan dan keluaran (*input-output*) satuan pembangkit listrik termal. Masukan berupa bahan bakar (kCal/jam) dan keluaran dalam bentuk daya listrik (MW). Untuk unit termal, karakteristik input-output merupakan pemakaian bahan bakar sebagai fungsi daya yang dibangkitkan atau fungsi biaya operasi. Satuan fungsi konsumsi bahan bakar generator adalah Btu per jam masukan panas ke unit (atau MBtu/jam). Tarif biaya bahan bakar dikali Btu/jam adalah Rp per jam (Rp/jam) yang dimasukkan ke unit bahan bakar. Output dari unit pembangkit akan dilambangkan dengan PG, output daya bersih megawatt dari unit tersebut. Selain biaya konsumsi bahan bakar, biaya operasional suatu unit juga mencakup biaya tenaga kerja, biaya pemeliharaan, dan biaya transportasi bahan bakar. Sulit untuk menyatakan biaya-biaya ini secara langsung sebagai fungsi output unit, sehingga biaya-biaya ini dimasukkan sebagai bagian tetap dari biaya operasional (Zhu, 2015).

Dalam *economic dispatch*, kurva karakteristik input output unit pembangkit didekati dengan persamaan *polynomial* orde dua (Saadat, 1999):

$$H_i = \gamma_i P_i^2 + \beta_i P_i + \alpha_i \quad (1)$$

Dimana: H_i = Karakteristik input-output (kcal/h)

P_i = Daya listrik yang dibangkitkan unit ke-i (MW)

α, β, γ = Konstanta-konstanta

2.2.5 Karakteristik kenaikan biaya

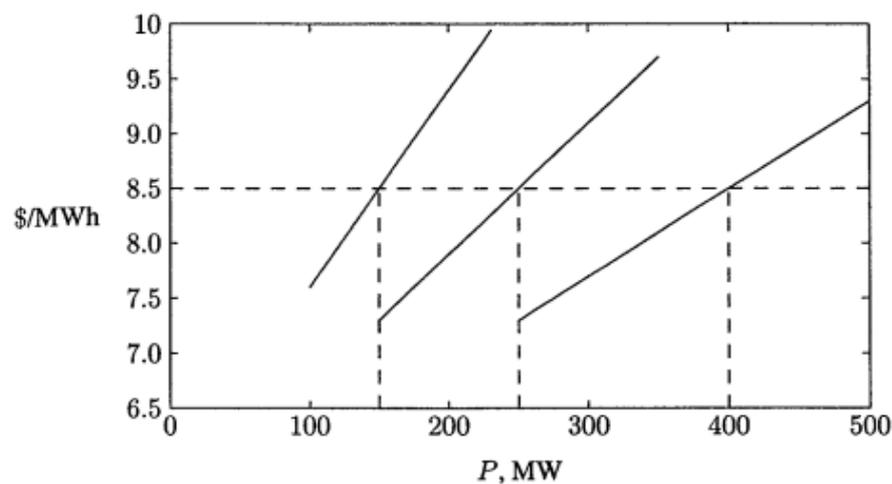
Karakteristik kenaikan biaya (*incremental cost*) atau disebut juga karakteristik laju kenaikan panas merupakan kemiringan (turunan pertama) karakteristik input dan output ($\Delta H/\Delta P$ atau $\Delta F/\Delta P$). Pada karakteristik ini ditunjukkan nilai Btu per kWh atau Rp/kWh terhadap daya keluaran dalam satuan

MW. Karakteristik ini lebih lanjut digunakan untuk perhitungan pembebanan ekonomis dari unit pembangkit (Zhu, 2015).

Jika kurva karakteristik input output unit pembangkit merupakan persamaan *polynomial* orde dua (kuadrat), maka karakteristik kenaikan biaya akan mempunyai bentuk garis lurus (linear), yang dinyatakan dengan persamaan (Saadat, 1999):

$$\frac{\partial H_i}{\partial P_i} = 2\gamma_i P_i + \beta_i \quad (2)$$

Persamaan (2) di atas merupakan turunan pertama dari fungsi karakteristik input output Persamaan (1) sebagai fungsi objektif yang akan diminimumkan. Teorema Fermat menjelaskan bahwa suatu fungsi f akan memiliki nilai lokal maksimum atau lokal minimum di titik c jika $f'(c)$ memiliki nilai dan $f'(c) = 0$ (Stewart, 2008). Persamaan ini dapat menjadi kondisi pendekatan untuk *optimal dispatch*. Untuk mendemonstrasikan konsep biaya tambahan yang sama untuk pengiriman yang optimal (*optimal dispatch*), kita dapat menggunakan perintah plot pada MATLAB untuk memplot biaya tambahan (*incremental cost*) setiap unit pembangkit pada grafik yang sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Grafik dari persamaan biaya kenaikan biaya bahan bakar (Saadat, 1999)

Untuk memperoleh penyelesaiannya, dapat dicoba berbagai nilai pada sumbu y hingga ditemukan nilai yang menghasilkan $\sum P_i = PD$. Untuk setiap nilai pada sumbu y , jika $\sum P_i < PD$, kita naikkan nilai sumbu y sebaliknya, jika $\sum P_i > PD$, kita turunkan nilai sumbu y . Oleh karena itu, garis putus-putus horizontal pada

grafik digerakkan ke atas atau ke bawah hingga pada titik optimum sumbu y , $\sum P_i = PD$. Untuk gambar di atas, dengan $PD = 800$ MW, pengiriman optimal adalah $P_1 = 400$ MW, $P_2 = 250$ MW, dan $P_3 = 150$ MW dan *incremental cost* sebesar 8.5 \$/MWh (Saadat, 1999).

2.3 Optimasi Unit Pembangkit Listrik

Optimasi unit pembangkit adalah proses penjadwalan beban total suatu sistem tenaga listrik kepada masing-masing unit atau pusat pembangkit sedemikian rupa sehingga jumlah biaya pengoperasian seminimal mungkin dengan kinerja pembangkit yang optimal. Seluruh pembangkit dalam sistem akan dikontrol secara terus menerus sehingga diperoleh pembangkitan yang optimal dengan biaya ekonomis tanpa mengabaikan berbagai kendala unit pembangkit yang ada. Pertimbangan yang diambil untuk mengoptimasi unit pembangkit pada sistem tenaga dapat dibagi atas dua bagian, yaitu: *unit commitment* dan *economic dispatch* (Ginting, Tuegeh, dan Silimang, 2022).

2.3.1 Pengaturan penjadwalan ekonomis (*unit commitment*)

Unit commitment merupakan penjadwalan hubung-lepas unit pembangkit pada sistem tenaga listrik dalam kurun waktu tertentu yang bertujuan untuk memenuhi permintaan beban. Penjadwalan ini biasanya ditentukan berdasarkan permintaan beban yang selalu berubah-ubah tiap waktunya. Tujuan utama dari penjadwalan ini adalah untuk mendapatkan biaya pembangkitan yang ekonomis dalam periode waktu tertentu, namun tetap mempertimbangkan batasan-batasan operasi yang ada. Setiap unit pembangkit memiliki berbagai batasan operasi seperti *spinning reserve*, *minimum up-down time*, pembangkitan daya maksimum dan minimum, dan biaya penyalaan unit pembangkitan. Di beberapa kasus konfigurasi jaringan transmisi juga dipertimbangkan, hal ini karena jaringan transmisi akan mengatur aliran daya maksimum yang dapat mengalir pada suatu saluran (Arindra, Wibowo, dan Riawan, 2016).

Permasalahan *unit commitment* merupakan kombinasi dari dua sub-masalah. Pertama adalah menentukan unit pembangkit yang akan dinyalakan. Kedua adalah menentukan jumlah biaya pembangkitan dari masing-masing unit yang

berkomitmen. Unit pembangkit memiliki perbedaan efisiensi operasi dan karakteristik kinerja yang merefleksikan inputan yang dibutuhkan. Dengan demikian, operasi *unit commitment* diselesaikan dalam dua tahap. Kombinasi unit pembangkit yang menghasilkan biaya produksi paling ekonomis akan dipilih sebagai jadwal *unit commitment* untuk setiap jam (Arindra, Wibowo, dan Riawan, 2016).

2.3.2 Pengaturan unit pembangkit (*economic dispatch*)

Dalam rangka memenuhi suatu beban tertentu, fokus utamanya adalah menentukan berapa besar daya yang harus dihasilkan oleh masing-masing unit pembangkit agar mencapai pembangkitan secara ekonomis, yang sering disebut sebagai *economic dispatch* (ED). Tujuan utama dari *economic dispatch* dalam sistem tenaga adalah mencari kombinasi optimal dari daya output dari seluruh unit pembangkit yang dapat mengurangi biaya total bahan bakar sekaligus memenuhi beban yang diminta serta memperhitungkan kendala operasional (Alhamdani, Hardiansyah, dan Arsyad, 2019).

2.4 Fungsi Biaya Bahan Bakar dari Persamaan Karakteristik Input-Output

Dalam pengoperasiannya setiap dari unit pembangkit termal memiliki kriteria dan katakteristik yang berbeda-beda. Kriteria input dan output dari pembangkit memperlihatkan suatu hubungan antara input biaya bahan bakar (Rp) dan output yang dihasilkan dari unit pembangkit (MW). Unit pembangkitan dapat dilakukan optimasi pengoperasian dengan memahami perbedaan karakteristik dari seluruh pembangkitan (Khamsawang dan Jiriwibhakorn, 2009). Secara umum, karakteristik input dan output unit pembangkitan diselesaikan dengan menggunakan fungsi polinomial orde dua yaitu sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1). Dari persamaan karakteristik input-output ini yang dikalikan dengan harga bahan bakar akan diperoleh fungsi biaya bahan bakar dengan persamaan:

$$F_i = H_i \times \text{harga bahan bakar} \quad (3)$$

dengan,

F_i : Biaya bahan bakar unit i

i : Masing-masing unit pembangkit

P_i : Daya pada unit i

Sehingga biaya total pembangkitan untuk seluruh unit pembangkit dapat direpresentasikan sebagai Persamaan (4). Dan untuk meminimalisasi penggunaan biaya bahan bakar pada pembangkitan total diperlukan nilai daya yang optimal dan dapat diselesaikan dengan Persamaan (5) (Khamsawang dan Jiriwibhakorn, 2009).

$$F_t = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (4)$$

Sehingga

$$\min F_t = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (5)$$

$$P_R = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i \quad (6)$$

dengan,

F_t : Total biaya bahan bakar

P_R : Total kebutuhan beban pada sistem

N : Jumlah unit pembangkit

$\min F_i$: Minimal total biaya bahan bakar

Tujuan yang ingin dicapai adalah untuk mendapatkan nilai F_t yang minimum untuk suatu P_R , sehingga diferensial total $dF_t = 0$ sesuai dengan Teorema Fermat menjelaskan bahwa suatu fungsi f akan memiliki nilai lokal maksimum atau lokal minimum di titik c jika $f'(c)$ memiliki nilai dan $f'(c) = 0$.

$$dF_t = \frac{\partial F_1}{\partial P_1} dP_1 + \frac{\partial F_2}{\partial P_2} dP_2 + \dots + \frac{\partial F_n}{\partial P_n} dP_n = 0 \quad (7)$$

Dengan total biaya bahan bakar tergantung pada macam-macam keluaran unit, permintaan P_R yang konstan dalam satu satuan waktu berarti bahwa P_R merupakan suatu pembatas pada nilai minimum F_t sehingga $dP_R = 0$ (Stevenson, 1984).

$$dP_1 + dP_2 + \dots + dP_n = 0 \quad (8)$$

Dengan mengalikan persamaan di atas dengan λ dan mengurangkan hasilnya dengan persamaan dF_t , serta mengumpulkan setiap sukunya, maka diperoleh

$$\left(\frac{\partial F_1}{\partial P_1} - \lambda\right) dP_1 + \left(\frac{\partial F_2}{\partial P_2} - \lambda\right) dP_2 + \dots + \left(\frac{\partial F_n}{\partial P_n} - \lambda\right) dP_n = 0 \quad (9)$$

Persamaan ini dipenuhi jika masing-masing sukunya sama dengan nol. Setiap turunan parsial menjadi turunan total karena hanya bahan bakar dari setiap unit saja yang jika hanya keluaran daya unit tersebut yang berubah. Misalnya $\partial F_n / \partial P_n$ menjadi dF_t / dP_n (Stevenson, 1984).

$$\frac{\partial F_1}{\partial P_1} = \lambda, \frac{\partial F_2}{\partial P_2} = \lambda, \dots, \frac{\partial F_n}{\partial P_n} = \lambda \quad (10)$$

Dari persamaan di atas, semua unit harus bekerja pada biaya bahan bakar tambahan (*incremental cost*) yang sama untuk mendapatkan biaya bahan bakar yang minimum seperti yang telah dijelaskan pada Subbab 2.2.5.

2.5 Perhitungan Persamaan Karakteristik Input Output

Persamaan karakteristik input-output dari unit pembangkit dapat ditentukan dengan pendekatan berikut (Zhu, 2015):

1. Berdasarkan percobaan efisiensi unit pembangkit (*performance testing*);
2. Berdasarkan catatan sejarah pengoperasian unit pembangkit (*operating record*);
3. Berdasarkan data desain unit pembangkit yang disediakan oleh pabrikan (*manufacture's guarantee data*).

Cara pertama merupakan cara yang paling teliti dan baik akan tetapi sangat mahal. Cara yang kedua dapat digunakan dengan baik, karena pengukuran nilai kalor terkandung dalam bahan bakar relatif mudah dilakukan. Sedangkan cara ketiga sangat mudah dilakukan karena tinggal melihat data yang diberikan oleh pabrik, cara ini tepat untuk sebuah pembangkit yang masih baru.

Dalam sistem tenaga, kita dapat dengan mudah memperoleh data statistik bahan bakar dan data statistik keluaran daya. Melalui analisis dan komputasi beberapa kumpulan data (H_k , P_k), kita dapat menentukan bentuk karakteristik input-output dan korespondensinya parameter. Misalnya, jika kurva kuadrat adalah yang paling cocok menurut data statistik, kita dapat menggunakan metode kuadrat terkecil (*least square method*) untuk menghitung parameternya. prosedur perhitungannya adalah sebagai berikut (Zhu, 2015):

Misalkan (H_k, P_k) diperoleh dari data statistik, dimana $k = 1, 2, \dots, n$, dan kurva bahan bakar adalah fungsi kuadrat. Untuk menentukan koefisien a, b , dan c , hitung error berikut untuk setiap pasangan data (H_k, P_k) :

$$\Delta H_k = (\gamma P_k^2 + \beta P_k + \alpha) - P_k \quad (11)$$

Berdasarkan prinsip kuadrat terkecil, kita membentuk tujuan sebagai berikut berfungsi dan membuatnya minimal, yaitu:

$$J = (\Delta H_k)^2 = \sum_{k=1}^n (\gamma P_k^2 + \beta P_k + \alpha - P_k)^2 \quad (12)$$

Kita akan mendapatkan kondisi yang diperlukan untuk nilai ekstrim dari fungsi tujuan ketika kita mengambil turunan pertama dari fungsi di atas J terhadap masing-masing fungsi tersebut. Variabel bebas γ, β , dan α , dan atur turunannya sama dengan nol. Sehingga kita memperoleh persamaan akhir (Zhu, 2015):

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n P_k^2 & \sum_{k=1}^n P_k & n \\ \sum_{k=1}^n P_k^3 & \sum_{k=1}^n P_k^2 & \sum_{k=1}^n P_k \\ \sum_{k=1}^n P_k^4 & \sum_{k=1}^n P_k^2 & \sum_{k=1}^n P_k^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n H_k \\ \sum_{k=1}^n (H_k P_k) \\ \sum_{k=1}^n (H_k P_k^2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Koefisien γ, β , dan α dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan di atas.

2.6 Batasan dalam Pembangkitan Tenaga Listrik

Dalam mengoperasikan pembangkit tenaga listrik yang ekonomis harus memenuhi batasan-batasan atau *constraints* yang ada. Dalam penelitian ini *constraints* yang digunakan adalah *equality constraints* dan *inequality constraints*. *Equality constraint* merupakan batasan dari kesetimbangan daya yang dihasilkan saat pengoperasian unit pembangkit, yang mengharuskan daya total yang dihasilkan oleh setiap unit pembangkit harus sesuai dengan jumlah kebutuhan beban konsumen dan rugi-rugi transmisi, yang dinyatakan dengan persamaan berikut (Syah, Dachlan, dan Hasanah, 2012):

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_{load} \quad (14)$$

dengan,

P_i : Daya output pembangkit (MW)

P_{load} : Total daya beban dari sistem (MW)

Inequality constraint merupakan batasan yang mengharuskan daya output dari setiap unit pembangkit yang ada lebih besar atau sama dengan daya minimum yang diperbolehkan dan juga lebih kecil atau sama dengan daya maksimum yang diperbolehkan oleh batasan yang telah ditentukan pada tiap unit pembangkit. Yang dapat dinyatakan sebagai persamaan berikut (Syah, Dachlan, dan Hasanah, 2012):

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (15)$$

dengan,

$P_{i,min}$: Batas minimal daya pembangkitan unit i

$P_{i,max}$: Batas maksimal daya pembangkitan unit i

P_i : Daya pembangkitan unit i

2.7 Metode Lagrange

Metode Lagrange merupakan metode konvensional yang banyak digunakan untuk menyelesaikan masalah *economic dispatch*, dengan menggunakan persamaan fungsi objektif yang mengabaikan *losses* sebagai berikut (Syah, Dachlan, dan Hasanah, 2012):

$$L = F_T + \lambda \left(P_R - \sum_{i=1}^n P_i \right) \quad (16)$$

Dengan:

L : Persamaan Lagrange

F_T : Total biaya pembangkitan (Rp/jam)

λ : Pengali Lagrange

P_i : Daya output masing-masing pembangkit (MW)

P_R : Total kebutuhan beban pada sistem (MW)

i: indeks pembangkit ke-i (i=1,2,3,...,n)

Kondisi operasi ekonomis diperoleh dengan cara menyamakan dengan nol semua turunan parsial pertama dari persamaan *Lagrange* terhadap variabel λ

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0 \quad (17)$$

Dengan P_R tidak tergantung pada perubahan P_i sehingga

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{\partial F_T}{\partial P_i} + \lambda(0 - 1) = 0 \quad (18)$$

$$2\gamma_i P_i + \beta_i = \lambda \quad (19)$$

Kondisi yang diperlukan untuk adanya kondisi biaya operasi minimum untuk sistem pembangkit termal adalah bahwa tingkat biaya tambahan semua unit sama dengan suatu nilai yang tidak dapat ditentukan, λ . Pada kondisi yang diperlukan ini harus menambahkan persamaan kendala bahwa jumlah daya yang dihasilkan harus sama dengan daya yang diminta oleh beban. Selain itu, ada dua pertidaksamaan yang harus dipenuhi untuk masing-masing unit yaitu: keluaran daya setiap unit harus lebih besar atau sama dengan daya minimum yang diizinkan dan juga harus lebih kecil atau sama dengan daya maksimum yang diizinkan pada unit tersebut. Kondisi dan ketidaksetaraan tersebut dapat dirangkum seperti terlihat pada kumpulan persamaan berikut (Wood dan Wollenberg, 1996):

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_i}{\partial P_i} &= \lambda \\ P_{i,min} &\leq P_i \leq P_{i,max} \\ \sum_{i=1}^n P_i &= P_{load} \end{aligned} \quad (20)$$

Untuk menemukan daya yang dibangkitkan setiap unit menggunakan Lagrange, maka dapat ditentukan daya pendekatan awal seperti persamaan berikut (Saadat, 1999):

$$P_i = \frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i} \quad (21)$$

Persamaan di atas menunjukkan hubungan persamaan-persamaan koordinasi dari fungsi λ . Persamaan di atas dapat diselesaikan dengan iterasi. Dengan substitusi persamaan di atas ke Persamaan (20) yang menunjukkan kesetimbangan daya, akan diperoleh nilai λ (Saadat, 1999).

$$\sum_{i=1}^n \frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i} = P_{load} \quad (22)$$

Sehingga akan diperoleh nilai λ :

$$\lambda = \frac{P_{load} + \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{2\gamma_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\gamma_i}} \quad (23)$$

Dalam teknik pencarian iterasi, hasil dari iterasi sebelumnya akan digunakan untuk menentukan λ baru (λ^{k+1}), penentuan nilai λ^{k+1} menggunakan persamaan-persamaan berikut (Saadat, 1999).

$$\Delta\lambda^k = \frac{\Delta P_{load}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\gamma_i}} \quad (24)$$

Nilai $\Delta\lambda^k$ yang didapatkan akan dijumlahkan dengan λ lama (λ^k) untuk mendapatkan λ baru (λ^{k+1}) seperti persamaan berikut:

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \Delta\lambda^k \quad (25)$$

Dimana

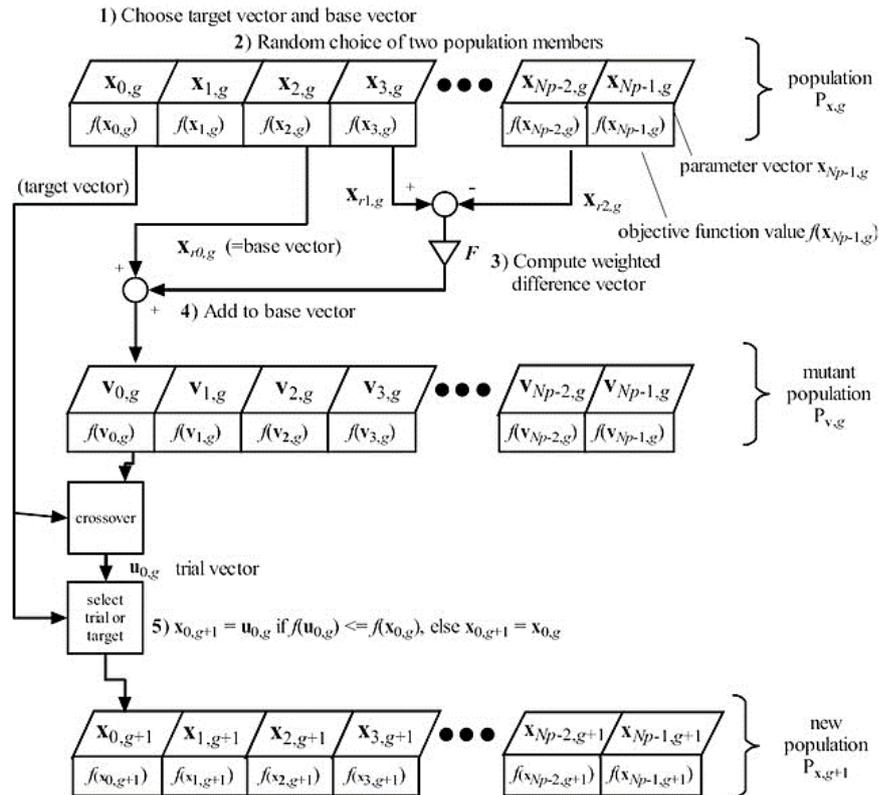
$$\Delta P_{load}^k = P_{load} - \sum_{i=1}^n P_i^k \quad (26)$$

Proses iterasi akan terus berlanjut sampai ΔP_{load}^k kurang dari nilai akurasi yang ditentukan.

2.8 Metode *Differential Evolution*

Salah satu algoritma komputasi untuk menyelesaikan permasalahan optimasi adalah *differential evolution* (DE) yang dikenalkan oleh Storn dan Kenneth Price dan dipublikasikan pada Oktober 1994 dalam majalah *Dr. Dobb's Journal*. Metode *differential evolution* merupakan salah satu tipe optimasi modern yang berbasis mekanisme pencarian populasi seperti GA, *optimasi bee colony*, dan PSO. Kelebihan DE dibanding dengan teknik optimasi lainnya adalah strukturnya yang sederhana, parameter kontrol yang sedikit dan konvergensi keandalan yang tinggi.

Operasi DE *Algorithm* dapat dijelaskan memiliki bagan diagram alir seperti pada Gambar 4.



Gambar 4 Diagram alir metode DE
(Fahira, 2015)

Dari bagan alir metode DE seperti di atas dapat dijelaskan dengan rinci sebagai berikut (Fahira, 2015):

1. Inisiasi

Dalam metode *differential evolution* menggunakan 2 buah populasi vektor yakni populasi awal yang akan terus diperbarui nilainya melalui proses iterasi dan populasi hasil mutasi. Masing-masing populasi terdiri dari N_p vector dengan D-dimensional parameter. Populasi awal, P_x , terdiri dari vector $X_{i,g}$ yang ditentukan sebagai *initial point*. Populasi awal DE secara matematis dapat digambarkan sebagai berikut :

$$P_{x,g} = (X_{i,g}), \quad i = 1, \dots, N_p, \quad g = 1, \dots, g_{max} \quad (27)$$

$$X_{i,g} = (X_{j,i,g}), \quad j = 1, \dots, D$$

$X_{i,g}$ merupakan vector ke-i pada pembangkitan ke g. Sedangkan $X_{j,i,g}$ adalah nilai vector ke-i pada parameter ke-j, pada pembangkitan ke g. Nilai i adalah bilangan asli dari 1 sampai N_p , g adalah bilangan asli dari 1 sampai g_{max} , dan j adalah bilangan asli dari 1 sampai D. Pada tahap inisialisasi, nilai awal vektor

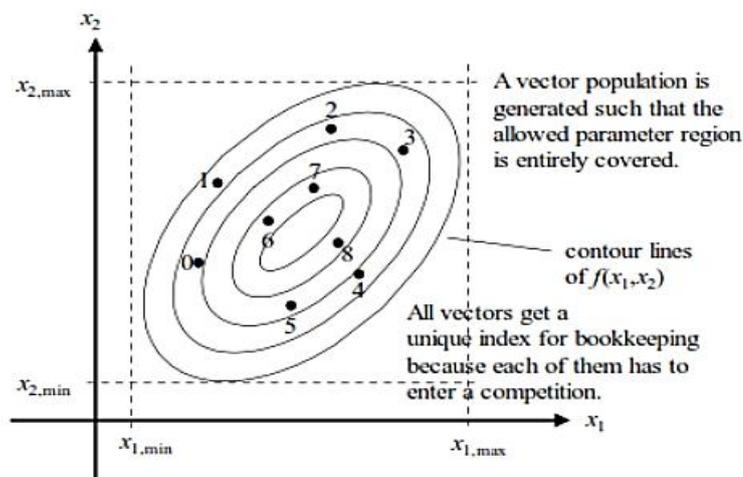
pada populasi awal diinisialisasi secara random pada suatu daerah tertentu yang memiliki suatu batasan. Batas atas, b_U , dan batas bawah, b_L , dari setiap vektor tersebut didefinisikan sebagai berikut:

$$x_j^L \leq x_{j,i,g} \leq x_j^U \quad (28)$$

$x_{j,i,g}$ adalah nilai vector ke-i pada parameter ke-j dan pembangkitan ke-g. Nilai masing-masing vektor awal tersebut dibangkitkan secara acak diantara batasan-batasan tersebut berdasarkan persamaan yang digunakan untuk inisialisasi populasi :

$$x_{j,i,g} = rand_j(0,1) \times (b_{j,U} - b_{j,L}) + b_{j,L} \quad (29)$$

Angka pembangkitan random, $rand_j(0,1)$, merupakan angka yang dibangkitkan secara acak antara range $[0,1]$. Pembangkitan populasi dari metode *differential evolution* dapat diilustrikan seperti pada Gambar 4.



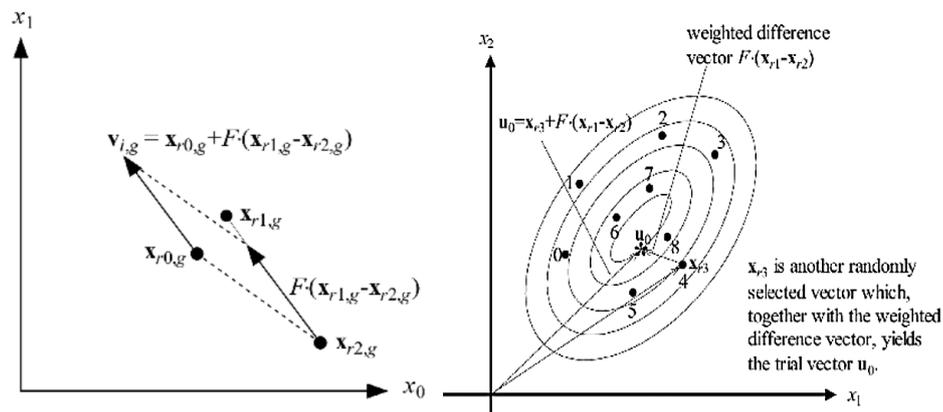
Gambar 5 Pembangkitan populasi DE
(Fahira, 2015)

Proses inisialisasi DE dapat dimisalkan hanya 2 buah parameter yang digunakan yakni x_1 dan x_2 sehingga dapat digambarkan bentuk 2 dimensi seperti gambar di atas. Ruang pencarian DE dibatasi oleh $(x_{1,min}, x_{1,max})$ untuk x_1 dan $(x_{2,min}, x_{2,max})$ untuk x_2 . Pada proses inisialisasi, vektor-vektor pada DE disebarakan secara acak atau random di dalam suatu ruang pencarian. Masing-masing vektor ditempatkan pada suatu titik dengan nilai x_1 dan x_2 yang berbeda-beda bagi setiap vektor. Kemudian nilai *fitness* masing-masing vektor didapatkan dengan cara memasukkan nilai x_1 dan x_2 pada fungsi $f(x_1, x_2)$.

Fitness setiap vektor dipresentasikan oleh beberapa garis kontur. Garis kontur terluar mempresentasikan daerah dengan nilai *fitness* yang paling buruk sedangkan kontur terdalam mempresentasikan daerah dengan nilai *fitness* yang paling baik.

2. Mutasi

Pada mutasi akan dibentuk populasi yang berisi *mutant vector* ($v_{i,g}$). Pembentukan ini dilakukan dengan mengkombinasi perbedaan vektor (*differential vector*) dari vektor satu ($x_{r1,g}$) dan vektor dua ($x_{r2,g}$) yang dipilih secara acak pada vektor ketiga (x_{r0}) seperti pada Gambar 5.



Gambar 6 Mutasi DE
(Fahira, 2015)

Pengkombinasian tiga perbedaan vektor ini merupakan strategi mutasi yang ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$v_{i,g} = x_{r0} + F \times (x_{r1,g} - x_{r2,g}) \quad (30)$$

Persamaan diatas mempresentasikan tahap mutasi pada DE dengan $v_{i,g}$ vektor mutan, x_{r0} , x_{r1} , dan x_{r2} sebagai vektor yang dipilih secara acak, serta F sebagai nilai *real* dengan range $[0,1]$. Nilai F inilah yang akan mengontrol pengaruh dari variasi *differential* dari $(x_{r1,g} - x_{r2,g})$.

3. Crossover

Tahap *crossover* adalah tahap dimana hasil akhirnya adalah sebuah populasi yang berisi *trial vector* (vektor uji). Populasi ini didapatkan dari hasil *crossover* antara populasi vektor awal dengan populasi vektor mutan.

$$u_{i,g} = u_{j,i,g} = \begin{cases} v_{j,i,g} & \text{if } (rand_j(0,1) \leq Cr \text{ or } j = j_{rand}) \\ x_{j,i,g} & \text{yang lain} \end{cases} \quad (31)$$

Probabilitas *crossover*, Cr dengan range [0,1], adalah nilai yang ditentukan oleh pengguna untuk mengontrol pembagian nilai parameter yang digandakan dari *mutant*. $Rand_j(0,1)$ adalah nilai random yang menentukan apakah vektor tersebut di-*crossover* atau tidak. Jika nilai $rand_j(0,1)$ suatu vektor adalah kurang dari nilai Cr, maka nilai vektor yang akan digandakan pada *trial vector* adalah *mutant vector*. Jika yang terjadi adalah sebaliknya, maka nilai vektor yang akan digandakan pada *trial vector* adalah vektor awal. Selain itu, *trial* parameter dengan indeks yang dipilih secara acak, j_{rand} , diperoleh dari *mutant* untuk memastikan bahwa *trial vector* tidak menduplikat $x_{i,g}$.

4. Seleksi

Pada tahap ini dilakukan seleksi untuk menentukan vector yang akan menjadi anggota populasi untuk iterasi selanjutnya. Jika *trial vector*, $u_{i,g}$, memiliki nilai *objective function* atau *fitness* sama atau lebih kecil daripada *fitness* vektor awal, maka ia mengganti target vektor pada pembangkitan atau iterasi selanjutnya. Sebaliknya, Jika *trial vector*, $u_{i,g}$, memiliki nilai *objective function* atau *fitness* yang lebih besar daripada *fitness* vektor awalnya, maka vektor awal tadi tetap menjadi anggota pada pembangkitan atau iterasi selanjutnya. Selanjutnya setelah populasi baru diperoleh, proses mutasi, *crossover* / rekombinasi, dan seleksi diulangi sampai nilai optimum diperoleh atau kriteria yang diinginkan tercapai atau mencapai iterasi maksimum.

$$x_{i,g} = \begin{cases} u_{i,g} & \text{if } f(u_{i,g}) \leq f(x_{i,g}) \\ x_{j,i,g} & \text{yang lain} \end{cases} \quad (32)$$

2.9 MATLAB

Matlab adalah singkatan dari *Matrix Laboratory* yang merupakan bahasa pemrograman yang dibuat dengan tujuan sebagai alat bantu perhitungan yang kompleks atau simulasi dari suatu sistem yang ingin di simulasikan, dalam matlab mutlak dibutuhkan pengetahuan tentang matriks yang dapat dipelajari dalam ilmu matematika (Noviansyah, 2019).

Matlab versi pertama dirilis pada tahun 1970 oleh Cleve Moler. Pada awalnya, Matlab didesain untuk menyelesaikan masalah-masalah persamaan aljabar linear. Seiring berjalannya waktu, program ini terus mengalami perkembangan dari segi fungsi dan performa komputasi. Matlab dikembangkan oleh MathWorks Inc. menggabungkan proses pemrograman, komputasi dan visualisasi numerik berkinerja tinggi. Kombinasi kemampuan analisis, fleksibilitas, keandalan, dan grafik yang kuat menjadikan Matlab paket perangkat lunak utama untuk ruang lingkup perguruan tinggi yang digunakan sebagai alat pembelajaran pemrograman matematika, teknik, dan sains pada level pengenalan dan lanjutan, sedangkan dalam dunia industri, Matlab dipilih sebagai alat penelitian, pengembangan, dan analisis produk industri. Matlab juga memiliki keunggulan umum lainnya, seperti analisis dan eksplorasi data, pengembangan algoritma, pemodelan dan simulasi, visualisasi plot dalam bentuk 2D dan 3D, hingga pengembangan aplikasi antar muka grafis. Matlab dapat dioperasikan pada sistem operasi Windows, Linux, maupun macOS. Selain itu, Matlab juga bisa dihubungkan dengan aplikasi atau bahasa pemrograman eksternal lainnya, seperti C, Java, .NET, dan Microsoft Excel. Dalam Matlab tersedia juga kotak kakas (*toolbox*) yang dapat digunakan untuk aplikasi-aplikasi khusus, seperti pengolahan sinyal, sistem kontrol, *fuzzy logic*, jaringan saraf tiruan, optimasi, pengolahan citra digital, bioinformatika, simulasi, dan berbagai teknologi lainnya (Tjolleng, 2017).

2.10 State of the Art

Beberapa penelitian terdahulu yang dijadikan sebagai bahan acuan penulis dalam melaksanakan penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1 *State of the art*.

Tabel 1 State of the art

No	Penulis/Tahun	Judul	Metode	Hasil	Perbedaan dengan Penelitian yang Diusulkan
1	Surekha P., S. Sumathi / 2012 (Surekha dan Sumathi, 2012)	<i>Solving Economich Load Dispatch Problems Using Differential evolution with Opposition Based Learning</i>	<i>Differential evolutionary dan Opposition Based Learning</i>	Hasil simulasi DE-OBL mampu mencapai solusi kualitas optimal dengan karakteristik konvergensi cepat.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Menggunakan gabungan dua metode (DE dan OBL) sedangkan pada penelitian ini hanya menggunakan metode DE, 2. Menggunakan 20 unit system sedangkan pada PLTU Punagaya hanya dua unit pembangkit
2	Achmad Faizal Tamin, Karnoto, Mochammad Facta / 2018 (Tamin, Karnoto, dan Facta, 2018)	Optimisasi Penjadwalan Ekonomis pada Unit Pembangkit PLTG Di PLTGU PT Indonesia Power Tambak Lorok Menggunakan Metode <i>Differential evolution Algorithm</i>	<i>Differential evolution Algorithm</i>	Metode optimisasi DEA dapat digunakan untuk solusi dari permasalahan penjadwalan ekonomis unit pembangkit PLTG di PLTGU Tambak Lorok dimana Perbandingan biaya operasi optimisasi metode DEA operasi sistem lebih hemat dibandingkan dengan biaya operasi pembebanan PLTGU Tambak Lorok.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Data yang digunakan yaitu data PLTGU Tambak Lorok sedangkan pada penelitian ini akan menggunakan data dari PLTU Punagaya. 2. Dikembangkan dengan mempertimbangkan rugi-rugi daya pada jaringan transmisi sedangkan pada penelitian yang akan dilakukan tidak mempertimbangkan rugi-rugi daya.
3	Andi Silfiah Prabawati, Wahyudi Wahdani / 2019 (Prabawati dan Wahdani, 2019)	Optimasi <i>Economic Dispatch</i> Pembangkit Thermal pada Sistem Kelistrikan Sulselrabar Menggunakan <i>Lagrange Multiplier</i> dan <i>Particle Swarm Optimization</i>	<i>Lagrange Multiplier dan Particle Swarm Optimization (PSO)</i>	Penelitian ini menghasilkan biaya pembangkitan yang ekonomis dengan memperhatikan batasan <i>equality</i> dan <i>inequality</i> menggunakan <i>Lagrange Multiplier</i> dan metode <i>Particle Swarm Optimization</i> dimana Metode PSO memberikan hasil yang paling baik	<ol style="list-style-type: none"> 1. Metode yang digunakan adala LM dan PSO sedangkan penelitian ini menggunakan metode DE 2. Memperhitungkan rugi-rugi saluran sedangkan penelitian ini mengabaikan rugi-rugi

No	Penulis/Tahun	Judul	Metode	Hasil	Perbedaan dengan Penelitian yang Diusulkan
4	Xueping Li, Hongjie Zhang, Zhigang Lu / 2019	<i>A Differential Evolution Algorithm Based on Multi-Population for Economic Dispatch Problems With Valve-Point Effects</i>	<i>Differential Evolution Algorithm Based on Multi-Population (MPDE)</i>	algoritma MPDE memiliki akurasi dan ketahanan yang lebih baik dibandingkan algoritma cerdas lainnya. Algoritma MPDE memiliki kinerja yang signifikan dalam akurasi untuk memecahkan masalah pengiriman ekonomi dengan efek titik katup.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Masalah ED dengan efek titik katub. Sedangkan pada penelitian ini fokus hanya pada masalah ED 2. Algoritma MPDE yang merupakan peningkatan dari algoritma DE. Sedangkan pada penelitian ini menggunakan algoritma DE 3. Diujikan pada sistem pengujian 13, 40, 80, dan 140 unit. Sedangkan penelitian ini menggunakan data PLTU Punagaya
5	Remigius Tandioga, Musrady Mulyadi, Azwar, Widya Wirawati Rauf / 2021 (Tandioga dkk., 2021)	Optimasi Operasi Unit-Unit Pembangkit pada PLTU Baru	<i>Lagrange Multiplier dan Dynamic Programming</i>	Optimasi unit-unit pembangkit pada PLTU Baru dengan menggunakan metode <i>Lagrange Multiplier</i> lebih optimal dibandingkan dengan metode <i>dynamic programming</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Berlokasi di PLTU Baru sedangkan penelitian ini dilaksanakan di PLTU Punagaya 2. Menggunakan metode Lagrange Multiplier dan Dynamic Programming sedangkan penelitian ini menggunakan metode <i>differential evolution</i> dan Lagrange Multiplier sebagai pembandingan.
6	Chenjia Feng, Chengcheng Shao, Xifan Wang / 2021 (Feng, Shao, dan Wang, 2021)	<i>A Fast Solution Method to Economic Dispatch Type Problem</i>	<i>Fast solution method</i>	Metode yang diusulkan mengungguli metode pemecah CPLEX dan Gurobi dan QP yang tersedia untuk mendapatkan hasil yang sama yang menggunakan waktu komputasi yang jauh lebih sedikit untuk berbagai sistem dengan tingkat beban dan ukuran yang berbeda.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Menggunakan metode <i>fast solution</i> . Sedangkan pada penelitian ini menggunakan algoritma DE 2. Menggunakan data IEEE 118 bus dan 300 bus. Sedangkan pada penelitian ini menggunakan data PLTU Punagaya

No	Penulis/Tahun	Judul	Metode	Hasil	Perbedaan dengan Penelitian yang Diusulkan
7	Amawan Hasibuan, Robi Kurniawan, Musamir Isa, Mursalin / 2021 (Hasibuan dkk., 2021)	<i>Economic Dispatch Analysis Using Equal Incremental Cost Method with Linear Regression Approach</i>	<i>Equal Incremental Cost</i> dengan pendekatan regresi linear	Perhitungan optimasi menggunakan metode <i>Equal Incremental Cost</i> dengan pendekatan Regresi Linier tidak layak diterapkan di PLTU Pangkalan Susu karena sebenarnya biaya di lapangan lebih murah bila dibandingkan dengan hasil perhitungan optimasi.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Data yang digunakan adalah PLTU Pangkalan Susu, sedangkan pada penelitian ini adalah data PLTU Punagaya 2. Menggunakan metode <i>Equal Incremental Cost</i> sedangkan pada penelitian ini menggunakan metode DE
8	Sanchari Deb, Diaa Salama Abdelminaam, Mokhtar Said, Essam H. Houssein / 2021 (Deb dkk., 2021)	<i>Recent Methodology-Based Gradient-Based Optimizer for Economic Load Dispatch Problem</i>	<i>Gradient-Based Optimizer (GBO)</i>	GBO memperoleh hasil yang lebih baik dalam menyelesaikan masalah ELD dan CEED dibandingkan dengan delapan algoritma metaheuristik lainnya seperti algoritma <i>Slime mold</i> (SMA), <i>Elephant herding optimize</i> (EHO), <i>Monarch Butterfly Optimization</i> (MBO), Algoritma <i>Moth Search</i> (MSA), Algoritma Optimasi Cacing Tanah (EWA), Algoritma <i>Artificial Bee Colony</i> (ABC), Algoritma <i>Tunicate Swarm</i> (TSA) dan Algoritma <i>Chimp Optimization</i> (ChOA). GBO memiliki keseimbangan yang baik antara eksplorasi dan eksploitasi dan jarang terjadi kemungkinan terjebak dalam kondisi optimal lokal dan konvergensi prematur.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Menggunakan metode <i>Gradient-Based Optimizer (GBO)</i> sedangkan pada penelitian ini menggunakan metode DE 2. Pengujian kinerja GBO pada ELD untuk berbagai skenario seperti ELD dengan rugi-rugi transmisi, CEED dan CEED dengan efek titik katup. Sedangkan pada penelitian ini adalah analisis ED mengabaikan <i>losses</i> pada PLTU Punagaya menggunakan metode DE

No	Penulis/Tahun	Judul	Metode	Hasil	Perbedaan dengan Penelitian yang Diusulkan
9	Burcin Ozkaya, Ugur Guvenc, Okan Bingol / 2022 (Ozkaya, Guvenc, dan Bingol, 2022)	<i>Fitness Distance Balance Based LSHADE Algorithm for Energy Hub Economic Dispatch Problem</i>	<i>Fitness Distance Balance</i> berdasarkan <i>Linear Population Size Reduction Success History Based Adaptive DE (FDB-LSHADE)</i>	Algoritma FDB-LSHADE yang dikembangkan sebagai hasil studi eksperimental komprehensif merupakan salah satu metode pencarian metaheuristik paling kuat, yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi yang tidak dibatasi dan dibatasi.	1. FDB-LSHADE diuji pada masalah Benchmark CEC14 dan CEC17, sedangkan pada penelitian ini menggunakan data PLTU Punagaya 2. Menggunakan metode FDB-LSHADE sedangkan pada penelitian ini hanya menggunakan metode DE 3. Metode yang digunakan merupakan pengembangan lanjutan daripada metode DE
10	Riswan Dinzi, Yulianta Siregar, Melinda Zubara Siregar / 2023 (Dinzi, Siregar, dan Siregar, 2023)	Perbandingan Metode <i>Differential evolutionary Algorithm</i> dengan <i>Lagrange Multiplier</i> Pada Optimisasi <i>Economic Dispatch</i>	<i>Differential evolutionary Algorithm</i> dan <i>Lagrange Multiplier</i>	Biaya bahan bakar setelah optimisasi menggunakan metode DEA lebih hemat dibandingkan dengan biaya bahan bakar PLTU Pangkalan Susu. Biaya bahan bakar hasil optimisasi memiliki biaya yang kurang lebih sama dengan metode Lagrange	Data yang digunakan adalah data dari PLTU Pangkalan Susu sedangkan pada penelitian ini menggunakan data PLTU Punagaya
11	Muhammad Shanhzar Saddique, Salman Habib, Shaikh Saaqib Haroon, Abdul Rauf Bhatti, Salman Amin, Emad M. Ahmed / 2022 (Saddique dkk., 2022)	<i>Optimal Solution of Reaktif Power Dispatch in Transmission System to Minimize Power Losses Using Sine-Cosine Algorithm</i>	<i>Sine-Cosine Algorithm (SCA)</i>	SCA telah mencapai posisi minimum global dengan iterasi yang lebih sedikit dan waktu yang lebih singkat dibandingkan dengan algoritma yang lainnya (PSO, WOA dan DE).	1. Menganalisis optimal <i>reactive power dispatch (ORPD)</i> , sedangkan pada penelitian ini fokus ke <i>economic dispatch (ED)</i> 2. Diuji pada IEEE 14 bus, 30 bus, dan 57 bus. Sedangkan pada penelitian ini menggunakan PLTU Punagaya.

No	Penulis/Tahun	Judul	Metode	Hasil	Perbedaan dengan Penelitian yang Diusulkan
12	Mokhtar Said, Essam H. Houssein, Sanchari Deb, Rania M. Ghoniem, Abber Galal Elsayed / 2022 (Said dkk., 2022)	<i>Economic Load Dispatch Problem Based on Search and Rescue Optimization Algorithm</i>	<i>Search and Rescue Optimization Algorithm</i>	Diperoleh hasil yang membuktikan keunggulan SAR dalam meminimalkan biaya bahan bakar untuk ELD dan emisi serta biaya bahan bakar untuk CEED. Metode SAR mencapai faktor power mismatch terbaik dalam penyelesaian ELD dan CEED dibandingkan dengan teknik GWO, EHO, SCA, ABC, EWA, MSA, MBO, TSA dan ChOA	<ol style="list-style-type: none"> 1. Menggunakan metode <i>Search and Rescue Optimization Algorithm (SAR)</i> sedangkan pada penelitian ini menggunakan metode DE 2. Menggunakan data IEEE. Sedangkan pada penelitian ini menggunakan data real PLTU Punagaya 3. Menggunakan dua operasi sistem tenaga listrik yakni <i>Combined Emissions and Economic Dispatch (CEED)</i> dan <i>Economic Load Dispatch (ELD)</i>. Sedangkan dalam penelitian in hanya operasi <i>Economic Dispatch (ED)</i>
13	Wang Bing, Zhang Pengfei, He Yufeng, Wang Xiaozhi, Zhang Xianxia / 2022 (Bing dkk., 2022)	<i>Scenario-oriented hybrid particle swarm optimization algorithm for robust economic dispatch of power system with wind power</i>	<i>Scenario-oriented hybrid particle swarm optimization algorithm</i>	Algoritma SHPSO yang dikembangkan dalam makalah ini mengungguli algoritma pengembangan PSO lainnya (PSO, HPSOCC, HPSOnc, dan MIW-PSO).	<ol style="list-style-type: none"> 1. Masalah ED dengan PLTB. Sedangkan pada penelitian in fokus hanya pada masalah ED 2. Menggunakan metode SHPSO yang menggabungkan simulated annealing (SA) dengan algoritma PSO. Sedangkan pada penelitian ini menggunakan algoritma DE 3. Diujikan pada sistem pengujian 10, 13, dan 40 unit. Sedangkan penelitian ini menggunakan data PLTU Punagaya