

OPTIMASI BIAYA PEMBANGKITAN UNIT PLTU BERBAHAN BAKAR BATUBARA MENGGUNAKAN METODE LAGRANGE

Brenda Mawarlisti¹⁾, Rudy Gianto²⁾, Yandri³⁾

¹⁾Mahasiswa Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura

^{2,3)}Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura

Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura

Email: brenda.mawar@teknik.untan.ac.id

ABSTRAK

Biaya bahan bakar yang besar membuat biaya operasi pembangkitan menjadi tidak ekonomis. Oleh karena itu diperlukan cara optimalisasi untuk meminimalkan biaya operasi dan penjadwalan ekonomis pada pembangkit. Besarnya kebutuhan suatu beban, karakteristik suatu pembangkit, batas maksimum dan minimum kapasitas pembangkit, serta pengeluaran untuk bahan bakar setiap unit pembangkit berpengaruh secara ekonomis pada pengoperasian pembangkit. Tujuan penelitian ini untuk memperoleh biaya pembangkitan seminimum mungkin pada suatu kondisi pembebanan tertentu pada sistem tenaga listrik. Data pembebanan yang digunakan yaitu sistem 5 unit dan sistem 10 unit generator pembangkit.

Metode yang digunakan adalah metode Lagrange dan perangkat lunak MATLAB secara ekonomis dan non-ekonomis. Hasil akhir penelitian ini menunjukkan bahwa, untuk sistem 5 unit dengan menggunakan metode Lagrange dan MATLAB sama-sama memiliki biaya pembangkitan yang ekonomis seperti pada saat beban 435 MW yang menghasilkan biaya pembangkitan sebesar \$1250,8754/jam dengan selisih \$13,6246/jam lebih murah dibandingkan metode non-ekonomis dengan biaya pembangkitan sebesar \$1264,5/jam. Akan tetapi perhitungan metode Lagrange pada sistem 10 unit tidak dapat ditemukan seutuhnya, perhitungan hanya dapat dilakukan pada saat beban 1036 MW dengan biaya pembangkitan sebesar \$59732,0886/jam dengan selisih \$14438,5478/jam lebih murah dibandingkan metode non-ekonomis dengan biaya pembangkitan sebesar \$74170,6364/jam. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa metode Lagrange tidak selalu dapat menghasilkan solusi optimalisasi. Ini dikarenakan sistem terlalu besar sehingga pada saat perhitungan output masing-masing unit pembangkit terjadi pengulangan iterasi

Kata kunci: Penjadwalan Ekonomis, Metode Lagrange, Biaya Pembangkitan.

I. PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi listrik saat ini sangat banyak dirasakan seiring dengan semakin majunya Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) dan pembangunan. Listrik merupakan salah satu bentuk energi yang sangat penting bagi kehidupan untuk memenuhi kebutuhan manusia. Untuk mengatasi kekurangan pasokan energi listrik, maka pemerintah membangun pusat pembangkit tenaga listrik untuk membangkitkan daya listrik. Daya listrik tersebut dikirim melalui jaringan transmisi dan didistribusikan ke berbagai macam beban listrik. Namun pengoperasian listrik ini harus memiliki pengaturan yang baik agar pengiriman daya dapat berjalan dengan lancar [1].

Sistem tenaga listrik pada dasarnya terdiri dari unit-unit pembangkit tenaga listrik yang bertujuan untuk melayani kebutuhan beban. Besar beban yang disuplai dan daya yang dihasilkan atau diproduksi oleh pembangkit harus seimbang sehingga pembangkit tersebut dapat dioperasikan secara optimal dengan biaya operasi seminimal mungkin. Pengoperasian pembangkit tenaga listrik secara optimal dan ekonomis dipengaruhi oleh beberapa hal yaitu karakteristik pembangkit, kebutuhan beban, kapasitas daya maksimum dan minimum pembangkit dan biaya bahan bakar tiap unit. Pada umumnya biaya bahan bakar merupakan komponen dengan biaya paling besar dari seluruh biaya

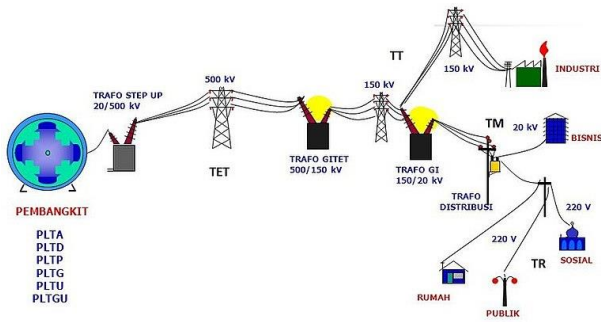
pengoperasian pembangkit. Sehingga pengoptimalan biaya pembangkit ini sangat penting, dimana pengoptimalan biaya pembangkit 1% saja dapat menghemat hingga milyaran rupiah pertahun pada sistem berskala besar [2]. Biaya bahan bakar yang besar membuat biaya operasi pembangkitan menjadi tidak ekonomis. Dengan itu dibutuhkan cara untuk meminimalkan biaya operasi dengan memenuhi variasi perubahan beban dan penjadwalan pengoperasian suatu generator pada pembangkit serta koordinasi antar pembangkitan sangat diperlukan dalam upaya melakukan optimalisasi pembebanan dengan memperhatikan batasan kapasitas unit pembangkit [3].

Berdasarkan latar belakang diatas, penulis tertarik untuk mengambil topik penelitian tugas akhir yaitu "Optimasi Biaya Pembangkitan Unit PLTU Berbahan Bakar Batubara Menggunakan Metode Lagrange"

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Tenaga Listrik

Secara umum sistem tenaga listrik terdiri atas komponen tenaga listrik yaitu pembangkit tenaga listrik, sistem transmisi dan sistem distribusi [8]. Rangkaian sistem tenaga listrik dapat dilihat pada Gambar 2.1.



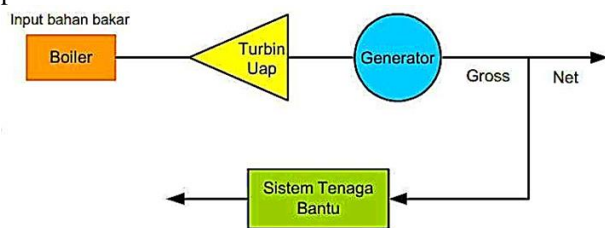
Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Energi listrik yang dihasilkan di pusat pembangkit listrik akan disalurkan melalui saluran transmisi kemudian melalui saluran distribusi akan sampai ke konsumen. Pada pusat pembangkit biasanya terdapat gardu induk yang memiliki peralatan utama seperti transformator, yang berfungsi untuk menaikkan tegangan generator (11 kV - 23 kV) menjadi tegangan transmisi atau tegangan tinggi (70 kV - 500 kV) dan juga peralatan pengaman dan pengatur [9].

Sistem tenaga listrik pada dasarnya terdiri dari unit-unit pembangkit tenaga listrik yang bertujuan untuk melayani kebutuhan beban. Besar beban yang disuplai dan daya yang dihasilkan atau diproduksi oleh pembangkit harus seimbang sehingga pembangkit tersebut dapat dioperasikan secara optimal dengan biaya operasi seminimal mungkin.

2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Secara umum, Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) terdiri dari boiler, turbin dan generator yang digunakan untuk mengubah bahan bakar menjadi energi listrik. Struktur dasar suatu PLTU bisa dilihat seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Struktur Dasar PLTU

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan suatu pusat pembangkit tenaga listrik yang bekerja dengan menggunakan uap air sebagai fluida kerjanya. Dengan memanfaatkan energi kinetik uap untuk menggerakkan poros sudut turbin. Prinsip sistem tenaga listrik dengan menggunakan uap dengan mengambil energi panas yang terkandung didalam bahan bakar batubara yang terbakar didalam boiler untuk produksi uap, kemudian dipindahkan ke dalam turbin, kemudian turbin tersebut akan mengubah energi panas yang diterima menjadi energi mekanis dalam bentuk gerak putar. Gerakan putar kemudian seporos dengan generator yang akhirnya menghasilkan listrik [10].

Unit-unit PLTU dibagi menjadi dua, yaitu beban maksimum dan beban minimum.

1) Beban Maksimum

Dalam spesifikasi teknis tersebut biasanya disebutkan beberapa beban maksimum untuk pembebanan yang kontinu dan beberapa beban maksimum untuk waktu tertentu, misalnya suatu unit PLTU boleh berbeban 110% selama dua jam.

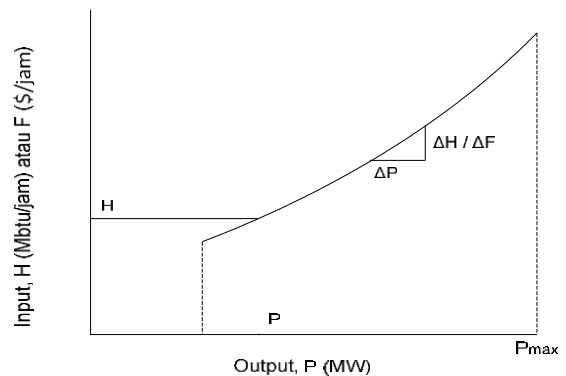
Apabila ada bagian dari unit pembangkit yang tidak normal, maka beban maksimum terpaksa diturunkan, misalnya menjadi 90%, tergantung dari hasil pengukuran berbagai parameter [5].

2) Beban Minimum

Beban minimum dari unit pembangkit PLTU berkisar 25% dari beban maksimum. Beban minimum ini biasanya berhubungan dengan masalah pengendalian, karena pada beban rendah banyak hubungan yang tidak linier sehingga menyulitkan bagi alat-alat kendali untuk bekerja.

2.3. Karakteristik PLTU

Karakteristik unit pembangkit yang beroperasi diperoleh dari perusahaan yang menjual generator, dimana telah dilakukan uji coba sebelum memasarkannya. Tetapi, jika perusahaan tidak memberikan karakteristik dari sebuah unit pembangkit yang telah dibeli dan siap untuk dioperasikan, maka operator dari stasiun pembangkit tersebut dapat melakukan serangkaian uji coba atau mencatat perbandingan antara input dan output dari unit pembangkit yang bersangkutan.



Gambar 2.3 Kurva Karakteristik *Input-Output* Pembangkit

Karakteristik input-output unit pembangkit sehingga output daya dibatasi oleh kapasitas minimal dan maksimal dari unit pembangkit, yaitu:

$$P_1 \leq P \leq P_2 \quad (2.1)$$

Umumnya, karakteristik input-output yang banyak digunakan dari unit pembangkit adalah fungsi kuadrat yaitu:

$$F_i = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (2.2)$$

Keterangan:

F = input bahan bakar (\$/jam)

P = output daya yang dihasilkan generator (MW)

a = koefisien fungsi biaya gaji karyawan (\$/jam)

b = koefisien fungsi biaya pembangkit (\$/MWh)

c = koefisien fungsi biaya bahan bakar (\$/MW²h)

i = unit pembangkit

Pada Gambar 2.5 dapat dilihat apabila daya yang dibangkitkan oleh unit bertambah $\Delta P = P_2 - P_1$, maka diperlukan penambahan pada input sebesar $\Delta F = F_2 - F_1$. Dengan kata lain, apabila output unit pembangkit berubah, maka biaya bahan bakar pun akan berubah. Perubahan jumlah bahan bakar yang terjadi diakibatkan oleh perubahan output, yang didefinisikan sebagai IR (*Incremental Rate*), dimana persamaan matematisnya sebagai berikut [11]:

$$IR = \frac{\Delta F}{\Delta P} \quad (2.3)$$

Dimana,

$IR = \text{Incremental Rate (BTU/MW)}$

$F = \text{bahan bakar (BTU)}$

$P = \text{daya (MW)}$

Apabila harga Δ menjadi sangat kecil, akan terjadi suatu limit yang mengakibatkan adanya penurunan IR menjadi:

$$IR = \frac{dF}{dP} \quad (2.4)$$

2.4. Penjadwalan Ekonomis

Penjadwalan ekonomis adalah pembagian pembebanan setiap unit pembangkit untuk memenuhi kebutuhan beban dengan biaya seminimum mungkin pada suatu sistem tenaga listrik yang selalu berubah disetiap periode waktu tertentu. Tujuan dilakukannya penjadwalan ekonomis yaitu untuk meminimalkan konsumsi bahan bakar dari pembangkit dengan menentukan daya keluaran setiap unit pembangkit. Dua *constraints* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *inequality constraints* dan *equality constraints*. *Inequality constraint* mengharuskan daya output dari tiap unit lebih besar dari atau sama dengan daya minimum yang diperbolehkan serta lebih kecil dari atau sama dengan daya maksimum yang diperbolehkan. *Equality constraint* merupakan batasan kesetimbangan daya, yang mengharuskan total daya yang dibangkitkan oleh masing-masing pembangkit harus sama dengan jumlah total kebutuhan beban dan rugi-rugi transmisi, yang dapat dinyatakan dengan persamaan berikut [12]:

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D + P_L \quad (2.5)$$

Dengan mengabaikan P_L :

$$P_D = \sum_{i=1}^n P_i \quad (2.6)$$

Dimana:

$P_i = \text{Output masing-masing pembangkit}$

$n = \text{Total jumlah unit pembangkit}$

$P_D = \text{Total daya yang dibutuhkan beban}$

$P_L = \text{Total rugi-rugi transmisi}$

Secara umum fungsi biaya dari setiap unit pembangkit dapat diformulasikan secara matematis sebagai suatu fungsi objektif, seperti yang diberikan pada persamaan dibawah ini:

$$F_T = \sum_{i=1}^n F_i \quad (2.7)$$

Dimana:

$F_T = \text{Total biaya pembangkitan (\$)}$

$F_i = \text{Fungsi biaya input-output pembangkit ke-i (\$/jam)}$

2.5. Metode Lagrange

Metode Lagrange merupakan metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah optimisasi biaya atau penjadwalan ekonomis [13]. Persamaan fungsi objektif yang digunakan dalam metode Lagrange adalah seperti pada persamaan:

$$\mathcal{L} = F_T + \lambda(P_D - \sum_{i=1}^n P_i) \quad (2.8)$$

Dimana:

$\mathcal{L} = \text{Persamaan Lagrange}$

$F_T = \text{Total biaya pembangkitan (\$/jam)}$

$\lambda = \text{Bilangan pengali Lagrange}$

Nilai minimum dari persamaan (2.8) terjadi pada titik dimana turunan-turunan parsialnya sama dengan nol:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_i} = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} = 0 \quad (2.10)$$

Dari persamaan diatas, menghasilkan:

$$\frac{\partial F_T}{\partial P_i} + \lambda(0 - 1) = 0 \quad (2.11)$$

Karena

$$F_T = F_1 + F_2 + \dots + F_n \quad (2.12)$$

Kemudian

$$\frac{\partial F_T}{\partial P_i} = \frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \quad (2.13)$$

Oleh sebab itu persamaan untuk penjadwalan optimal:

$$\frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.14)$$

Atau

$$b_i + 2c_i P_i = \lambda \quad (2.15)$$

Selanjutnya, dari persamaan (2.14) menghasilkan:

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D \quad (2.16)$$

Ketika rugi-rugi diabaikan tanpa batasan generator, untuk sebagian besar operasi ekonomis, maka semua pembangkit harus beroperasi pada biaya produksi tambahan yang sama ketika memenuhi batasan persamaan yang diberikan oleh persamaan (2.16). Oleh karena itu persamaan (2.15) dapat digunakan untuk menyelesaikan P_i :

$$P_i = \frac{\lambda - b_i}{2c_i} \quad (2.17)$$

Persamaan (2.17) dikenal sebagai persamaan koordinasi, yang merupakan fungsi dari λ . Solusi untuk memperoleh nilai λ didapat dengan mensubstitusikan P_i pada persamaan (2.16) yaitu:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\lambda - b_i}{2c_i} = P_D \quad (2.18)$$

Atau

$$\lambda = \frac{P_D + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2c_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2c_i}} \quad (2.19)$$

Dengan demikian, syarat-syarat untuk penjadwalan ekonomis pembangkit dengan memperhitungkan limit-limit generator menjadi:

$$\frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \quad \text{untuk} \quad P_{i(\min)} < P_i < P_{i(\max)} \quad (2.20)$$

$$\frac{dF_i}{dP_i} \leq \lambda \quad \text{untuk} \quad P_i = P_{i(\max)} \quad (2.21)$$

$$\frac{dF_i}{dP_i} \geq \lambda \quad \text{untuk} \quad P_i = P_{i(\min)} \quad (2.22)$$

2.6. Optimisasi Dengan MATLAB

Untuk menggunakan fungsi-fungsi pada MATLAB, maka permasalahan yang diselesaikan harus mengikuti bentuk umum yang diatur oleh MATLAB. Berikut aturan umum untuk menggunakan fungsi-fungsi pada MATLAB yang terkait dengan optimisasi (fmincon) [14].

2.6.1 Fungsi fmincon ()

Pada bagian ini diberikan cara penggunaan fungsi *fmincon()*, model optimisasi harus disusun dalam bentuk umum MATLAB yaitu:

$$\text{Min } f(x) \quad (2.23)$$

Tunduk pada kendala:

$$A_x \leq b, A_{eq}x = b_{eq}, c(x) \leq 0, c_{eq}(x) = 0 \text{ dan } lb \leq x \leq ub \quad (2.24)$$

Artinya semua model optimisasi harus dalam format persamaan (2.24) sehingga dapat menggunakan fungsi *fmincon*. Bagian ini penggunaannya dapat dilihat dengan mengetikkan 'help fmincon' pada jendela perintah MATLAB. Kita buat program MATLAB 'kendalac(x)' yang merupakan tata tulis dari semua kendala. Jika kendala persamaan tidak ada dapat ditulis sebagai [] dalam MATLAB. Sebelum kita menggunakan program-program dalam MATLAB, kita perlu tahu argumen-argumen yang akan muncul dalam program-program yang akan kita pakai.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Lokasi Penelitian

Laboratorium Sistem dan Distribusi, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura.

3.2. Alat yang Digunakan

1. Laptop
2. Aplikasi Matlab R2012b
3. Kalkulator Scientific

3.3. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dapat dilihat pada gambar 2.4.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Karakteristik Pembangkit Termal

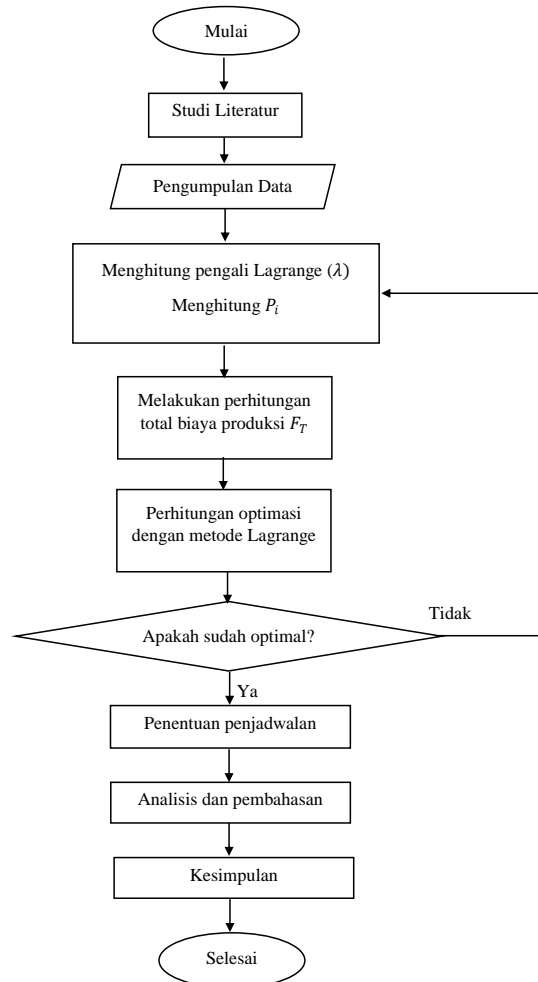
Sistem yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari 5 unit dan 10 unit [15]. Pada sistem lima unit, masalah penjadwalan ekonomis diselesaikan dengan horizon penjadwalan satu hari dengan 12 interval masing-masing satu jam. Permintaan beban untuk 10 unit ini diperkirakan dengan horizon penjadwalan satu hari dengan 6 interval, dimana data yang digunakan yaitu dua data beban dasar dan empat data beban puncak

Tabel 4.1 Karakteristik 5 Unit Generator

Unit	Fungsi Biaya Gaji Karyawan (\$/jam)	Fungsi Biaya Pembangkit (\$/MWh)	Fungsi Biaya Bahan Bakar (\$/MW ² h)	P _{min} (MW)	P _{max} (MW)
1	25	2	0,0080	10	75
2	60	1,8	0,0030	20	125
3	100	2,1	0,0012	30	175
4	120	2	0,0010	40	250
5	40	1,8	0,0015	50	300

Tabel 4.2 Permintaan Beban 5 Unit Generator

Waktu (jam)	Beban (MW)	Waktu (jam)	Beban (MW)
01:00	410	07:00	626
02:00	435	08:00	654
03:00	475	09:00	690
04:00	530	10:00	704
05:00	558	11:00	720
06:00	608	12:00	740



Gambar 2.4 Diagram Alir Penelitian

Tabel 4.3 Karakteristik 10 Unit Generator

Unit	Fungsi Biaya Gaji Karyawan (\$/jam)	Fungsi Biaya Pembangkit (\$/MWh)	Fungsi Biaya Bahan Bakar (\$/MW ² h)	P _{min} (MW)	P _{max} (MW)
1	786,7988	38,5397	0,1524	150	470
2	451,3251	46,1591	0,1058	135	470
3	104,9977	40,3965	0,0280	73	340
4	1243,5311	38,3055	0,0354	60	300
5	1658,5696	36,3278	0,0211	73	243
6	1356,6592	38,2704	0,0179	57	160
7	1450,7045	36,5104	0,0121	20	130
8	1450,7045	36,5104	0,0121	47	120
9	1455,6056	39,5804	0,1090	20	80
10	1469,4026	40,5407	0,1295	10	55

Tabel 4.4 Permintaan Beban 10 Unit Generator

Waktu (jam)	Beban (MW)
01:00	1036
02:00	1110
10:00	2022
11:00	2106
12:00	2150
13:00	2072

4.2. Perhitungan Optimasi Menggunakan Metode Lagrange

Untuk menghitung optimasi suatu unit pembangkit, dapat dilakukan dengan mencari persamaan karakteristik dari pembangkit itu sendiri. Dimana data yang diperlukan untuk mengetahui persamaan karakteristik adalah nilai fungsi biaya gaji karyawan, nilai fungsi biaya pembangkit dan nilai fungsi biaya bahan bakar. Setelah dimasukkan karakteristik masing-masing pembangkit untuk 5 unit dan 10 unit pembangkit kedalam persamaan 2.2 maka dilakukanlah perhitungan seperti dibawah ini.

4.2.1. Hasil Perhitungan 5 Unit Generator dengan Metode Lagrange

$$P_D = 410 \text{ MW}$$

$$\lambda = \frac{P_D + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2c_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2c_i}}$$

$$\lambda_1 = \frac{410 + \frac{2}{2(0,008)} + \frac{1,8}{2(0,003)} + \frac{2,1}{2(0,0012)} + \frac{2}{2(0,001)} + \frac{1,8}{2(0,0015)}}{\frac{1}{2(0,008)} + \frac{1}{2(0,003)} + \frac{1}{2(0,0012)} + \frac{1}{2(0,001)} + \frac{1}{2(0,0015)}}$$

$$\lambda_1 = \frac{410 + \frac{2}{0,016} + \frac{1,8}{0,006} + \frac{2,1}{0,0024} + \frac{2}{0,002} + \frac{1,8}{0,003}}{\frac{1}{0,016} + \frac{1}{0,006} + \frac{1}{0,0024} + \frac{1}{0,002} + \frac{1}{0,003}}$$

$$\lambda_1 = \frac{3972}{1775}$$

$$\lambda_1 = \$2,2377/\text{MWh}$$

$$P_i = \frac{\lambda - b_i}{2c_i}$$

$$P_1 = \frac{2,2377 - 2}{2(0,008)} = 14,8563 \text{ MW}$$

$$P_2 = \frac{2,2377 - 1,8}{2(0,003)} = 72,95 \text{ MW}$$

$$P_3 = \frac{2,2377 - 2,1}{2(0,0012)} = 57,375 \text{ MW}$$

$$P_4 = \frac{2,2377 - 2}{2(0,001)} = 118,85 \text{ MW}$$

$$P_5 = \frac{2,2377 - 1,8}{2(0,0015)} = 145,9 \text{ MW}$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = (14,8563) + (72,95) + (57,375) + (118,85) + (145,9)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = 409,9313 \text{ MW}$$

$$F_T = \sum_{i=1}^n F_i$$

$$F_T = [25 + 2(14,8563) + 0,008(14,8563)^2] + [60 + 1,8(72,95) + 0,003(72,95)^2] + [100 + 2,1(57,375) + 0,0012(57,375)^2] + [120 +$$

$$2(118,85) + 0,001(118,85)^2] + [40 +$$

$$1,8(145,9) + 0,0015(145,9)^2]$$

$$F_T = (56,4775) + (207,221) + (224,4378) + (371,825) + (334,55)$$

$$F_T = \$1194,5113/\text{jam}$$

$$\mathcal{L} = F_T + \lambda(P_D - \sum_{i=1}^n P_i)$$

$$\mathcal{L} = 1194,5113 + 2,2377(410 - 409,9313)$$

$$\mathcal{L} = \$1194,665/\text{jam}$$

4.2.2. Hasil Perhitungan 10 Unit Generator dengan Metode Lagrange

$$P_D = 1036 \text{ MW}$$

$$\lambda = \frac{P_D + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2c_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2c_i}}$$

$$\lambda_1 =$$

$$\frac{1036 + \frac{38,5397}{2(0,1524)} + \frac{46,1591}{2(0,1058)} + \frac{40,3965}{2(0,028)} + \frac{38,3055}{2(0,0354)} + \frac{36,3278}{2(0,0211)} + \frac{38,2704}{2(0,0179)} + \frac{36,5104}{2(0,0121)} + \frac{36,5104}{2(0,0121)} + \frac{39,5804}{2(0,109)} + \frac{40,5407}{2(0,1295)}}{\frac{1}{2(0,1524)} + \frac{1}{2(0,1058)} + \frac{1}{2(0,028)} + \frac{1}{2(0,0354)} + \frac{1}{2(0,0211)} + \frac{1}{2(0,0179)} + \frac{1}{2(0,0121)} + \frac{1}{2(0,0121)} + \frac{1}{2(0,109)} + \frac{1}{2(0,1295)}}$$

$$\lambda_1 =$$

$$\frac{1036 + \frac{38,5397}{0,3048} + \frac{46,1591}{0,2116} + \frac{40,3965}{0,056} + \frac{38,3055}{0,0708} + \frac{36,3278}{0,0422} + \frac{38,2704}{0,0358} + \frac{36,5104}{0,0242} + \frac{36,5104}{0,0242} + \frac{39,5804}{0,218} + \frac{40,5407}{0,259}}{\frac{1}{0,3048} + \frac{1}{0,2116} + \frac{1}{0,056} + \frac{1}{0,0708} + \frac{1}{0,0422} + \frac{1}{0,0358} + \frac{1}{0,0242} + \frac{1}{0,0242} + \frac{1}{0,218} + \frac{1}{0,259}}$$

$$\lambda_1 = \$43,3928/\text{MWh}$$

$$P_i = \frac{\lambda - b_i}{2c_i}$$

$$P_1 = \frac{43,3928 - 38,5397}{2(0,1524)} = 15,9222 \text{ MW}$$

$$P_2 = \frac{43,3928 - 46,1591}{2(0,1058)} = -13,0732 \text{ MW}$$

$$P_3 = \frac{43,3928 - 40,3965}{2(0,028)} = 53,5054 \text{ MW}$$

$$P_4 = \frac{43,3928 - 38,3055}{2(0,0354)} = 71,8545 \text{ MW}$$

$$P_5 = \frac{43,3928 - 36,3278}{2(0,0211)} = 167,4171 \text{ MW}$$

$$P_6 = \frac{43,3928 - 38,2704}{2(0,0179)} = 143,0838 \text{ MW}$$

$$P_7 = \frac{43,3928 - 36,5104}{2(0,0121)} = 284,3967 \text{ MW}$$

$$P_8 = \frac{43,3928 - 36,5104}{2(0,0121)} = 284,3967 \text{ MW}$$

$$P_9 = \frac{43,3928 - 39,5804}{2(0,109)} = 17,4881 \text{ MW}$$

$$P_{10} = \frac{43,3928 - 40,5407}{2(0,1295)} = 11,0120 \text{ MW}$$

Karena penjadwalan belum sempurna, maka dilakukan penjadwalan ulang seperti dibawah ini,

$$\bullet \frac{dF_i}{dP_i} = \lambda, \quad b_i + 2c_i P_i = \lambda$$

$$\frac{dF_1}{dP_1} = 38,5397 + 0,3048(P_1)$$

$$= 38,5397 + 0,3048(150)$$

$$= 84,2597$$

$$P_1 = 150 \text{ MW}$$

$$\frac{dF_2}{dP_2} = 46,1591 + 0,2116(P_2)$$

$$= 46,1591 + 0,2116(135)$$

$$= 74,7251$$

$$P_2 = 135 \text{ MW}$$

$$\frac{dF_3}{dP_3} = 40,3965 + 0,056(P_3)$$

$$= 40,3965 + 0,056(73)$$

$$= 44,4845$$

$$P_3 = 73 \text{ MW}$$

$$\frac{dF_7}{dP_7} = 36,5104 + 0,0242(P_7)$$

$$= 36,5104 + 0,0242(130)$$

$$= 39,6564$$

$$P_7 = 130 \text{ MW}$$

$$\frac{dF_8}{dP_8} = 36,5104 + 0,0242(P_8)$$

$$= 36,5104 + 0,0242(120)$$

$$= 39,4144$$

$$P_8 = 120 \text{ MW}$$

$$\frac{dF_9}{dP_9} = 39,5804 + 0,218(P_9)$$

$$= 39,5804 + 0,218(20)$$

$$= 39,4144$$

$$P_9 = 20 \text{ MW}$$

$$\bullet P_1 + P_2 + P_3 + P_7 + P_8 + P_9 = 628$$

$$P_4 + P_5 + P_6 + P_{10} + 628 = 1036$$

$$P_4 + P_5 + P_6 + P_{10} = 408$$

$$\bullet \frac{\lambda - 38,3055}{0,0708} + \frac{\lambda - 36,3278}{0,0422} + \frac{\lambda - 38,2704}{0,0358} + \frac{\lambda - 40,5407}{0,259} = 408$$

$$\lambda = \$43,6030/MWh$$

$$P_4 = \frac{43,6030 - 38,3055}{0,0708} = 74,8234 \text{ MW}$$

$$P_5 = \frac{43,6030 - 36,3278}{0,0422} = 172,3981 \text{ MW}$$

$$P_6 = \frac{43,6030 - 38,2704}{0,0358} = 148,9553 \text{ MW}$$

$$P_{10} = \frac{43,6030 - 40,5407}{0,259} = 11,8236 \text{ MW}$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10}$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = (150) + (135) + (73) + (74,8234) + (172,3981) + (148,9553) + (130) + (120) + (20) + (11,8236)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1036,0004 \text{ MW}$$

$$\bullet F_T = \sum_{i=1}^n F_i$$

$$F_T = [786,7988 + 38,5397(150) + 0,1524(150)^2] + [451,3251 + 46,15918(135) + 0,1058(135)^2] + [1049,9977 + 40,3965(73) + 0,028(73)^2] + [1243,5311 + 38,3055(74,8234) + 0,0354(74,8234)^2] + [1658,5696 + 36,3278(172,3981) + 0,0211(172,3981)^2] + [1356,6592 +$$

$$38,2704(148,9553) + 0,0179(148,9553)^2] + [1450,7045 + 36,5104(130) + 0,0121(130)^2] + [1450,7045 + 36,5104(120) + 0,0121(120)^2] + [1455,6056 + 39,5804(20) + 0,109(20)^2] + [1469,4026 + 40,5407(11,8236) + 0,1295(11,8236)^2]$$

$$F_T = (9996,7538) + (8611,0086) + (4148,1542) + (4307,8672) + (8548,5286) + (7454,3976) + (6401,5465) + (6006,1925) + (2290,8136) + (1966,8434)$$

$$F_T = \$59732,1060 / \text{jam}$$

$$\bullet \mathcal{L} = F_T + \lambda(P_D - \sum_{i=1}^n P_i)$$

$$\mathcal{L} = 59732,1060 + 43,6030(1036 - 1036,0004)$$

$$\mathcal{L} = \$59732,0886 / \text{jam}$$

4.3. Pembahasan Hasil

4.3.1. Pembahasan Hasil 5 Unit Generator

Tabel 4.5 Perbandingan Biaya Pembangkitan (Sistem 5 Unit)

Beban (MW)	Biaya Pembangkitan (\$/jam)		
	Lagrange	MATLAB	Non-Ekonomis
410	1194,6650	1194,7204	1205,5000
435	1250,8754	1250,8754	1264,5000
475	1341,6177	1341,6021	1373,2750
530	1468,2095	1468,1176	1493,4700
558	1533,3110	1533,3111	1560,6540
608	1651,0462	1651,0463	1667,5520
626	1693,8447	1693,8447	1711,5192
654	1760,8553	1760,8554	1772,9360
690	1847,7910	1847,7908	1854,7500
704	1881,8357	1881,8357	1892,8010
720	1920,9063	1920,9063	1932,4200
740	1969,9886	1969,9880	1982,5000

Dari Tabel 4.5 terlihat pada saat beban 410 MW dimana metode Lagrange lebih ekonomis dibandingkan dengan MATLAB dan metode non-ekonomis. Pada saat beban 435 MW terlihat bahwa metode Lagrange dan MATLAB sama-sama ekonomis. Pada saat beban 475 MW terlihat bahwa metode MATLAB lebih ekonomis dibanding metode Lagrange dan non-ekonomis.

4.3.2. Pembahasan Hasil 10 Unit Generator

Tabel 4.6 Perbandingan Biaya Pembangkitan (Sistem 10 Unit)

Beban (MW)	Biaya Pembangkitan (\$/jam)		
	Lagrange	MATLAB	Non-Ekonomis
1036	59732,0886	59732,0886	74170,6364
1110	-	63003,9011	77813,7694
2022	-	124210,9350	139195,7630
2106	-	134498,4210	142869,8140
2150	-	140238,8080	145304,5980
2072	-	130228,2780	141277,3460

Dari Tabel 4.6 terlihat pada beban 1036 MW, dimana metode Lagrange dan MATLAB memiliki biaya pembangkitan yang sama-sama ekonomis. Sedangkan

pada beban-beban lainnya biaya pembangkitan menggunakan metode Lagrange tidak dapat diselesaikan. Hal ini dikarenakan pada saat perhitungan keluaran masing-masing unit pembangkit P_i , terjadi pengulangan iterasi pada perhitungan sehingga tidak dapat menemukan nilai akhir pada keluaran masing-masing unit pembangkit. Hal tersebut membuat biaya pembangkitan dengan menggunakan metode Lagrange tidak dapat dihitung seperti pada saat beban 1036 MW.

V. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari perhitungan dan pengujian simulasi pada penelitian ini, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode Lagrange dapat mengoptimalkan suatu pembangkit dengan mengetahui karakteristik dari suatu pembangkit itu sendiri yaitu perbandingan antara banyaknya bahan bakar yang digunakan dengan besarnya daya yang dihasilkan.
2. Pembagian beban pada 5 unit pembangkit yang memiliki nilai ekonomis yang lebih tinggi dengan menggunakan metode Lagrange adalah pembangkit unit 4. Untuk pembagian beban pada 10 unit pembangkit yang memiliki nilai ekonomis yang lebih tinggi dengan menggunakan metode Lagrange adalah pembangkit unit 5.
3. Untuk sistem 5 unit generator pembangkit, perbandingan antara metode Lagrange dengan MATLAB tidak terlalu jauh yaitu sekitar $\pm \$0,0205/\text{jam}$ dan memiliki perbandingan dengan metode non-ekonomis sekitar $\pm \$16,4131/\text{jam}$. Untuk sistem 10 unit generator pembangkit, perbandingan antara metode Lagrange dan metode lainnya hanya bisa dilakukan pada saat beban 1036 MW dimana metode Lagrange dan MATLAB memiliki biaya pembangkitan yang sama ekonomis dengan selisih $\$0/\text{jam}$ dan perbandingan metode non-ekonomis dengan MATLAB sekitar $\pm \$11453,2492/\text{jam}$. Dari kedua sistem tersebut disimpulkan bahwa metode Lagrange dan MATLAB sama-sama memiliki biaya pembangkitan yang ekonomis, sedangkan dengan perbandingan terhadap metode non-ekonomis jauh lebih mahal dibanding metode Lagrange dan MATLAB.
4. Dari perhitungan menggunakan metode Lagrange untuk sistem 10 unit generator pembangkit, dapat disimpulkan bahwa metode Lagrange tidak selalu dapat menghasilkan solusi optimalisasi. Ini dikarenakan sistem terlalu besar sehingga pada saat perhitungan output untuk masing-masing unit pembangkit terjadi pengulangan dalam iterasi sehingga tidak ditemukan solusi akhir dari nilai output tersebut, maka perhitungan untuk mengetahui biaya pembangkitan dari suatu pembangkit tidak dapat dilakukan.

5.2. Saran

Adapun saran penulis sebagai pengembangan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Penggunaan metode Lagrange tidak selalu bisa menemukan solusi untuk optimasi suatu pembangkit, walaupun tidak selalu ekonomis untuk pengujian tanpa rugi-rugi transmisi tetapi metode Lagrange bisa digunakan sebagai pembanding dengan metode lainnya.
2. Melakukan perbandingan dengan menggunakan metode lain seperti *Genetic Algorithm*, *Gradient*, *Particle Swarm Optimization* dan lain-lain.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. T. Arozaq, "Analisis Pembebanan Ekonomis Pada Jaringan 5000kV Jawa Bali Menggunakan Software PowerWorld," *Jurnal Teknik Pomits*, vol. I, no. 1, pp. 2-6, 2012.
- [2] A. R. Mukhtar, "Penjadwalan Pembangkit Hidro-Thermal Menggunakan Metode Dynamic Programming," 2010.
- [3] Yulisman, "Perancangan Perangkat Lunak Untuk Pembebanan Optimal Dan Biaya Bahan Bakar Stasiun Pembangkit," *Menara Ilmu*, vol. X, no. 2, 2016.
- [4] Suhendar, "Optimasi Pembagian Beban PLTU Suralaya Menggunakan Metode Ant Colony Optimization," *Seminar Nasional IENACO*, 2014.
- [5] Syamsuddin and Suardi, "Analisis Biaya Minimum Pembangkit Listrik Pada Unit Pembangkit 1 Wilayah VII Tello di Makassar," Makassar, 2015.
- [6] A. Risena, "Analisis Penjadwalan Unit Pembangkit Termis Dengan Metode Lagrange Multiplier (Studi Kasus di PLTU Tanjung Jati B)," *Transient*, vol. 7, no. 2, p. 375, Juni 2018.
- [7] K. Abri, "Optimasi Pembebanan Pembangkit Menggunakan Random Drift Particle Swarm Optimization (RDPSO) Pada Sistem Interkoneksi Jawa-Bali 500kV," *Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, 2016.
- [8] D. A. Pratama, "Economic and Emission Dispatch pada Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Berdasarkan RUPTL 2015 – 2024 Menggunakan Modified Artificial Bee Colony Algorithm," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, 2016.
- [9] D. Marsudi, *Pembangkitan Energi Listrik*, 2nd ed., Jakarta: Erlangga, 2005.
- [10] M. Sembiring, "Optimasi Operasi Ekonomis Pembangkit Thermal Dengan Metode Fuzzy Logic (Studi Kasus : PLTU Pangkalan Susu)," 2020.
- [11] J. Zhu, "Optimization of Power System Operation," second ed., Addresses advanced methods and optimization technologies and their applications in power, 2015.

- [12] H. Saadat, "Power System Analysis," Kevin Kane, 1999.
- [13] S. R. Permata, "Evaluasi Operasi Pembangkitan Tenaga Listrik Pada PT. Cikarang Listrindo Menggunakan Metode Lagrange Multipliers," 2013.
- [14] H. A. Parhusip, Optimasi Tak Linier (berdasarkan data-data penelitian, disertai program MATLAB 6.5), vol. X, W. Ed., Salatiga: Tisara Grafika, 2014.
- [15] I. Radziukyniene, "C-Grasp Application To The Economic Dispatch Problem," 2010.

BIOGRAFI



Brenda Mawarlisti, lahir di Pontianak, Kalimantan Barat pada tanggal 28 Januari 2000. Memulai Pendidikan di Sekolah Dasar Negeri 58 Sungai Raya lulus tahun 2012, melanjutkan ke Sekolah Menengah Pertama Negeri 01 Sungai Raya lulus pada tahun 2015, kemudian melanjutkan ke Sekolah

Menengah Atas Negeri 01 Sungai Raya lulus tahun 2018. Memperoleh Gelar Sarjana dari Program Studi Teknik Elektro Universitas Tanjungpura pada tahun 2022.

Menyetujui:
Pembimbing Utama,

Ir. Rudy Gianto, M.T., Ph.D
NIP.196703271992031004

Pembimbing Pendamping,

Yandri, S.T., M.T
NIP.196903291999031001

