

PENJADWALAN OPTIMUM PEMBANGKIT THERMAL MENGUNAKAN METODE ITERASI LAMBDA STUDI KASUS PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP BOLOK

Wellem F. Galla¹, Nursalim², Evtaleny Mauboy³, Fransiskus H. Wete⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknik Undana,
Jl Adisucipto Penfui, Kupang, Indonesia 85000
Email: fridzgalla@yahoo.coml.com

ABSTRACT

The research aims to perform optimum scheduling on the PLTU Bolok thermal plant by using lambda iterations simulated with MATLAB software. Hacyl Research suggests that minimum fuel consumption at LOADS of 10 to 25 MW is done optimization with 2 operation units. Minimum fuel consumption at a load of 10 to 20 MW is carried out optimization with the operation of Unit 2 and Unit 3. Minimum fuel consumption at a load of 25 MW minimum fuel consumption carried out an optimization of Unit 3 and Unit 4 operation. Minimum fuel consumption in the simulation load of 30 MW to 40 MW carried out optimization with 3 units operation. Minimum fuel consumption on the load of 30 MW and 35 MW carried out an optimization of units 2, 3 and 4. Minimum fuel consumption at 40 MW loads carried out an optimization of the 1.3- and 4-unit operations. The minimum fuel consumption at a load of 45 to 55 MW is conducted 4-unit operation optimization where the 1st unit is most dominant in carrying the load between the other unit, while the most dominant unit 4 carries the load between the other unit when the load is 55 MW.

Keywords: MATLAB, Economic Dispatch, at Least Square, Lambda iteration.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan penjadwalan optimum pada pembangkit thermal PLTU Bolok dengan menggunakan iterasi lambda yang disimulasikan dengan software MATLAB. Hasil penelitian menunjukkan bahwa, konsumsi bahan bakar minimum pada beban 10 sampai 25 MW dilakukan optimasi dengan pengoperasian 2 unit. Konsumsi bahan bakar minimum pada beban 10 sampai 20 MW dilakukan optimasi dengan pengoperasian unit 2 dan unit 3. Konsumsi bahan bakar minimum pada beban 25 MW konsumsi bahan bakar minimum dilakukan optimasi pengoperasian unit 3 dan unit 4. Konsumsi bahan bakar minimum pada simulasi beban 30 MW sampai 40 MW dilakukan optimasi dengan pengoperasian 3 unit. Konsumsi bahan bakar minimum pada beban 30 MW dan 35 MW dilakukan optimasi pengoperasian unit 2, 3 dan 4. Konsumsi bahan bakar minimum pada beban 40 MW dilakukan optimasi pengoperasian unit 1,3 dan 4. Konsumsi bahan bakar minimum pada beban 45 sampai 55 MW dilakukan optimasi pengoperasian 4-unit dimana unit 1 paling dominan dalam memikul beban diantara unit lainnya, sedangkan unit 4 paling dominan memikul beban diantara unit lainnya saat beban 55 MW.

Kata Kunci: MATLAB, Economic Dispatch, Least Square, Iterasi Lambda.

I. PENDAHULUAN

Pada sistem tenaga listrik, energi listrik yang dibangkitkan berasal dari pusat listrik seperti

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) dan lain-lain. Pembangkit Thermal merupakan pembangkit listrik yang

dibangkitkan dari energi panas hasil pembakaran bahan bakar fosil atau energi alam seperti solar, batu bara, panas bumi dan lain-lain, kemudian energi panas ini dikonversikan menjadi energi gerak untuk memutar turbin generator listrik sehingga menghasilkan energi listrik seperti PLTU, PLTD, dan PLTG. Dalam hal biaya operasi sistem tenaga listrik pada pembangkit thermal terutama biaya bahan bakar mengambil 60% dari total biaya operasi sistem tenaga listrik secara keseluruhan [1]. Oleh karena itu biaya yang cukup besar dari biaya bahan bakar dapat mempengaruhi biaya produksi dari sistem pembangkit listrik. Untuk itu perlu dilakukan optimasi agar mendapat biaya bahan bakar yang minimum. Salah satu cara untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah melakukan *Economic dispatch*. *Economic Dispatch* digunakan untuk membagi beban di antara unit-unit thermal yang beroperasi agar dicapai biaya bahan bakar yang minimum. Salah satu cara atau metode yang digunakan dalam melakukan penjadwalan ekonomis adalah dengan metode iterasi lambda. Dalam penelitian ini penulis menggunakan bantuan komputer dengan aplikasi MATLAB dalam melakukan perhitungan yang bertujuan untuk mempermudah dalam menentukan karakteristik input-output unit pembangkit dan melakukan penjadwalan unit - unit pembangkit. Data yang diperlukan dalam menentukan penjadwalan optimum pembangkit adalah data konsumsi bahan bakar, daya keluaran pembangkit, dan beban harian yang dipikul masing-masing unit pembangkit. PLTU Bolok merupakan salah satu pembangkit listrik Thermal yang berada di Desa Bolok Kecamatan Kupang Barat, Kabupaten Kupang NTT. Dalam PLTU Bolok terdapat 4 unit yang beroperasi untuk menyuplai daya listrik yakni 2 unit milik PLN dengan kapasitas 2 x 16,5 MW dan 2 unit milik PT. SMSE dengan kapasitas 2 x 18 MW yang telah terinterkoneksi untuk menyuplai daya listrik ke beban sistem Timor.

II. METODE PENELITIAN

Economic Dispatch adalah suatu usaha untuk menentukan besar daya yang harus di suplai dari

tiap unit generator untuk memenuhi beban tertentu dengan tujuan meminimumkan biaya operasi pembangkit [2]. Dalam Economic Dispatch, ada dua batasan atau *constraints* tertentu yang harus dipenuhi, yaitu *equality constraint* dan *inequality constraints*. *Equality constraint* adalah batasan kesetimbangan daya, yaitu mengharuskan total daya yang dibangkitkan harus memenuhi total kebutuhan daya yang dinyatakan pada persamaan 2.2.

$$\sum_{i=1}^{Ng} P_i = P_D \tag{2.2}$$

Dimana :

P_i = Daya keluaran pembangkit unit i. (MW)

P_D = Daya yang dibutuhkan. (MW)

Inequality constraints adalah batasan yang mengharuskan daya keluaran yang dibangkitkan unit harus lebih besar atau sama dengan daya minimum yang diperbolehkan dan lebih kecil atau sama dengan daya maksimum yang diperbolehkan. Batasan ini dinyatakan pada persamaan 2.3 [3].

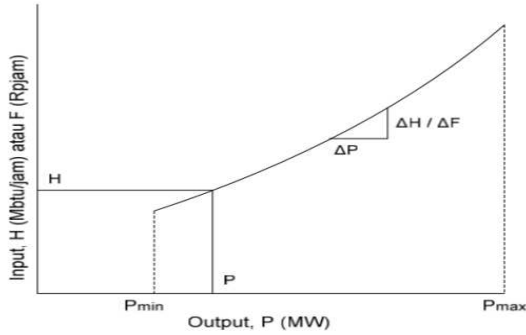
$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \tag{2.3}$$

Karakteristik input-output pembangkit thermal adalah karakteristik yang menggambarkan hubungan antara input bahan bakar berupa konsumsi bahan bakar dalam bentuk (Kg/Jam) atau bisa juga dalam bentuk energi panas (kCal/jam) dan output yang dihasilkan oleh pembangkit berupa daya (MW). Dengan mengetahui perbedaan karakteristik di antara semua pembangkit yang ada, optimasi pengoperasian pembangkit dapat dilakukan. Secara umum, karakteristik input-output pembangkit didekati dengan fungsi polinomial yaitu

$$F(P) = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \tag{2.4}$$

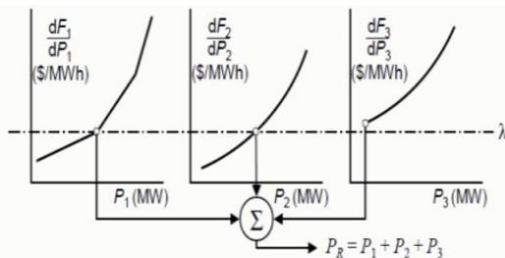
Dimana :

- F(P) atau H = input bahan bakar (Btu/jam)
- F_i = biaya bahan bakar pembangkit thermal ke-i (Rp/jam)
- P_i = output pembangkit thermal ke-i (MW)
- $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ = konstanta input-output pembangkit thermal ke-i (Rp/MW.jam)
- i = indeks pembangkit ke i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$)



Gambar 1 Kurva karakteristik *input-output* unit *thermal*

Metode Iterasi Lambda adalah salah satu metode yang digunakan dalam *Economic Dispatch* di mana tingkat biaya tambahan diasumsikan terlebih dahulu. Misalkan untuk menemukan titik operasi optimum yang ekonomis dengan tiga unit pembangkit maka, dilakukan pendekatan dengan cara menentukan plot pada karakteristik biaya tambahan untuk setiap unit pada grafik yang sama, seperti membuat sketsa



Gambar 2. Grafik solution untuk *Economic Dispatch*

Dalam membuat titik operasi dari setiap unit dengan biaya minimum dan waktu yang sama dapat menggunakan sketsa dan penggaris untuk menemukan solusi. Dengan mengasumsikan sebuah λ untuk menemukan keluaran daya dari setiap unit, maka dapat diketahui biaya tambahan yang dibutuhkan tiap unit. Estimasi λ pertama akan menjadi salah karena total keluaran daya terlalu kecil, sehingga dibutuhkan solusi baru yang dapat meningkatkan keluaran daya yang kecil. Dengan adanya dua solusi dapat meramalkan kemungkinan nilai yang diinginkan dari total daya yang diterima. Jika mengetahui total permintaan dan biaya tambahan maka dengan cepat menemukan titik operasi yang diinginkan.

Langkah pertama dalam penelitian yang dilakukan dalam menentukan penjadwalan optimum pembangkit thermal menggunakan metode

iterasi lambda studi kasus PLTU Bolok yaitu mencari data-data yang dibutuhkan dalam perhitungan. Data-data yang dicari yaitu data input berupa energi panas bahan bakar kCal/Jam, data output berupa daya listrik pembangkit thermal, batas maksimum dan minimum pengoperasian pembangkit thermal serta beban harian pembangkit thermal.

Langkah berikutnya menentukan karakteristik input output pembangkit dengan melakukan pendekatan metode kuadrat terkecil

Kemudian melakukan economic dispatch menggunakan metode iterasi lambda

- Mengasumsikan besar tingkat biaya tambahan, λ^k . Persamaan $\lambda = \frac{dF_i}{dP_i}$
- Menentukan besar beban yang dipikul untuk semua pembangkit P_D
- Menghitung besar daya yang dibangkitkan unit ke i , P_i . Persamaan $P_i^k = \frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i}$
- Menghitung selisih antara permintaan daya dan jumlah daya yang dibangkitkan unit ΔP^k . Persamaan $P_D = \sum_{i=1}^{N_g} \frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i}$

$$\Delta P^k = P_D - \sum_{i=1}^{N_g} P_i^k$$

- Menghitung besar $\Delta \lambda^k$ untuk memperoleh besar tingkat biaya tambahan yang baru, $\lambda^{(k+1)}$. Persamaan

$$\Delta \lambda^k = \frac{\Delta P^k}{\left(\frac{\partial f(\lambda)}{\partial \lambda}\right)^k} = \frac{\Delta P^k}{\sum_{i=1}^{N_g} \left(\frac{dP_i}{d\lambda}\right)} = \frac{\Delta P^k}{\sum_{i=1}^{N_g} \frac{1}{2\gamma_i}}$$

- Menghitung besar tingkat biaya tambahan yang baru, $\lambda^{(k+1)} = \lambda^k + \Delta \lambda^k$.
- Menghitung kembali besar daya yang dibangkitkan, P_i^{k+1} sampai diperoleh total daya yang dibangkitkan unit sama dengan kebutuhan beban.
- Memasukkan besar daya, P_i^k ke dalam Persamaan $F_i = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2$

- Menghitung total konsumsi bahan bakar, Total CF, dengan menjumlahkan konsumsi bahan bakar setiap pembangkit.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Langkah awal untuk melakukan optimasi penjadwalan sistem pembangkit termal, perlu ditentukan persamaan karakteristik input-output pembangkit. Sama seperti pada pembangkit PLTU Bolok, persamaan dicari dengan metode least square. Persamaan karakteristik input output untuk setiap unit pembangkit termal dapat dilihat pada tabel I.

Tabel 1 karakteristik input output unit PLTU Bolok

Setelah mendapatkan karakteristik input output setiap unit PLTU Bolok maka dilakukan perhitungan *economic dispatch* menggunakan metode iterasi lambda, dalam penelitian ini perhitungan dilakukan dengan MATLAB. Untuk membuat perhitungan economic dispatch hal yang pertama dilakukan adalah pengujian perhitungan economic dispatch terhadap data sampel yang diambil dari dispatcher milik PLN pada tanggal 29 oktober 2018 pada pukul 01.00 – 03.00 WITA.

Tabel 2 Hasil Pengujian economic dispatch terhadap data dispatcher

| No. | Waktu | Economic Dispatch | P1 (MW) | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | Ptotal (MW) | konsumsi bahan bakar (Kg/Jam) |
|-----|-------|-------------------|---------|---------|---------|---------|-------------|-------------------------------|
| 1 | 01:00 | Sebelum | 14 | 12,4 | 15 | 15 | 56,4 | 49974,11267 |
| | | Sesudah | 14,8317 | 12,7 | 13,8683 | 15 | 56,4 | 49689,20578 |
| 2 | 02:00 | Sebelum | 14 | 12,2 | 14,5 | 14,6 | 55,3 | 49118,95929 |
| | | Sesudah | 14,6756 | 12,1559 | 13,4685 | 15 | 55,3 | 48880,62287 |
| 3 | 03:00 | Sebelum | 14 | 12,1 | 13,7 | 13,6 | 53,4 | 47838,27638 |
| | | Sesudah | 14,5031 | 10,8704 | 13,0266 | 15 | 53,4001 | 47608,2053 |

Berdasarkan pengujian economic dispatch terhadap data dispatcher konsumsi bahan bakar dari ketiga sampel uji mengalami penghematan setelah melakukan Economic Dispatch. Hal ini dilihat dari nilai konsumsi bahan bakar yang lebih besar sebelum melakukan economic dispatch terhadap nilai konsumsi bahan bakar setelah melakukan economic dispatch. Pada pukul 01:00 mengalami penghematan konsumsi bahan bakar

sebesar 284,9068875 Kg/Jam. Kemudian pukul 02:00 juga mengalami penghematan sebesar 238,33642 Kg/Jam. Dan pukul 03:00 mengalami penghematan sebesar 230,07108 Kg/Jam. Jadi rata-rata penghematan konsumsi bahan bakar untuk semua unit PLTU Bolok beroperasi selama 3 jam adalah 251,1047 Kg/Jam. Berdasarkan pengujian sesudah dilakukan economic dispatch dapat menghemat konsumsi bahan bakar sehingga perhitungan economic dispatch ini dapat digunakan dalam pengoperasian PLTU Bolok dalam menyuplai daya ke beban.

Dalam menentukan *economic dispatch* dengan studi kasus 4 unit beroperasi digunakan metode iterasi lambda yang perhitungannya dapat diaplikasikan dalam MATLAB. Dalam studi ka-

| Unit | Karakteristik Input Output (kCal/Jam) |
|---------------|--|
| PLTU Bolok I | $F_1 = 2,1615 \times 10^8 - 2,5035 \times 10^7 P_1 + 9,5439 \times 10^5 P_1^2$ |
| PLTU Bolok II | $F_2 = 3,1193 \times 10^7 - 0,0137 \times 10^7 P_2 + 0,0128 \times 10^7 P_2^2$ |
| PLTU IPP I | $F_3 = 7,7153 \times 10^7 - 0,7061 \times 10^7 P_3 + 0,0373 \times 10^7 P_3^2$ |
| PLTU IPP II | $F_4 = 3,1193 \times 10^7 - 0,0137 \times 10^7 P_4 + 0,0128 \times 10^7 P_4^2$ |

ini simulasi beban yang diberikan adalah 10 MW – 55 MW. hasil perhitungannya dapat dilihat pada tabel berikut ini

Tabel 3 Economic dispatch 4 unit PLTU Bolok dengan simulasi beban 10 - 55 MW

| No | Beban (MW) | λ (kCal/MWh) | P1 (MW) | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P Total | Konsumsi Bahan Bakar (Kg/Jam) |
|----|------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|
| 1 | 10 | -17399880 | 4 | 2 | 2 | 2 | 10 | 65284,78 |
| 2 | 15 | -7855980 | 9 | 2 | 2 | 2 | 15 | 50251,53 |
| 3 | 20 | -3531957,90 | 11,2653 | 2 | 4,7347 | 2 | 20 | 44217,16 |
| 4 | 25 | -1381404,51 | 12,392 | 2 | 7,6201 | 2,9879 | 25 | 41506,73 |
| 5 | 30 | -353769,43 | 12,9304 | 2 | 8,9989 | 6,0708 | 30 | 40473,88 |
| 6 | 35 | 540937,55 | 13,3991 | 2,6468 | 10,1993 | 8,7548 | 35 | 40641,43 |
| 7 | 40 | 1111184,46 | 13,6979 | 4,8722 | 10,9644 | 10,4655 | 40 | 41624,84 |
| 8 | 45 | 1681431,37 | 13,9966 | 7,0976 | 11,7295 | 12,1763 | 45 | 43287,11 |
| 9 | 50 | 2251678,27 | 14,2954 | 9,3231 | 12,4946 | 13,887 | 50 | 45628,30 |
| 10 | 55 | 2925538,86 | 14,6484 | 11,9529 | 13,3987 | 15 | 55 | 48669,79 |

Berdasarkan tabel 3 untuk simulasi beban 10 MW sampai 55 MW konsumsi bahan bakar yang paling sedikit adalah simulasi beban 30 MW dengan nilai konsumsi bahan bakar yang diperoleh 28383,0744 Kg/Jam dengan daya optimal $P_1 = 12,9304$ MW, $P_2 = 2$ MW, $P_3 = 8,9989$ MW dan $P_4 = 6,0708$ MW.

Economic dispatch dengan studi kasus 3-unit beroperasi dengan simulasi 10 MW sampai 40 MW. Pada studi kasus ini terdapat empat kemungkinan kombinasi terjadi, yaitu kombinasi unit 1,2 dan 3 beroperasi, kemudian kombinasi unit 1, 2 dan 4 beroperasi, lalu kombinasi unit 1, 3 dan 4 beroperasi dan yang terakhir kombinasi unit 2, 3 dan 4 beroperasi. hasil simulasi dengan beban 10 MW dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4 Economic dispatch 3 unit beroperasi dengan simulasi beban 10 MW

| No | Beban (MW) | λ (kCal/MWh) | P1 (MW) | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P Total | Konsumsi Bahan Bakar (Kg/Jam) |
|----|------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|
| 1 | 10 | -13582320 | 6 | 2 | 2 | 0 | 10 | 46726,43333 |
| 2 | 10 | -13582320 | 6 | 2 | 0 | 2 | 10 | 42545,68095 |
| 3 | 10 | -13582320 | 6 | 0 | 2 | 2 | 10 | 50424,51429 |
| 4 | 10 | -2588880 | 0 | 2 | 6 | 2 | 10 | 30142,32857 |

Berdasarkan tabel 4 untuk simulasi beban 10 MW, kombinasi 3-unit konsumsi bahan bakar yang paling sedikit adalah kombinasi unit 2,3 dan 4 dengan nilai konsumsi bahan bakarnya 30142,32857 Kg/Jam dengan daya optimal $P_2 = 2$ MW, $P_3 = 6$ MW dan $P_4 = 2$ MW.

hasil simulasi dengan beban 15 MW dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 5 Economic dispatch 3 unit beroperasi dengan simulasi beban 15 MW

| No | Beban (MW) | λ (kCal/MWh) | P1 (MW) | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P Total | Konsumsi Bahan Bakar (Kg/Jam) |
|----|------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|
| 1 | 15 | -5140019,3 | 10,4229 | 2 | 2,5771 | 0 | 15 | 36132,65939 |
| 2 | 15 | -4038420 | 11 | 2 | 0 | 2 | 15 | 32057,14524 |
| 3 | 15 | -5140019,3 | 10,4229 | 0 | 2,5771 | 2 | 15 | 39830,74034 |
| 4 | 15 | -830462,1 | 0 | 2 | 8,3593 | 4,6407 | 15 | 28383,0744 |

Berdasarkan tabel 5 untuk simulasi beban 15 MW kombinasi 3-unit konsumsi bahan bakar yang paling sedikit adalah kombinasi unit 2,3 dan 4

dengan nilai konsumsi bahan bakarnya 28383,0744 Kg/Jam dengan daya optimal $P_2 = 2$ MW, $P_3 = 8,3593$ MW dan $P_4 = 4,6407$ MW.

hasil simulasi dengan beban 20 MW dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 6 Economic dispatch 3 unit beroperasi dengan simulasi beban 20 MW

| No | Beban (MW) | λ (kCal/MWh) | P1 (MW) | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P Total | Konsumsi Bahan Bakar (Kg/Jam) |
|----|------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|
| 1 | 20 | -2459917 | 11,827 | 2 | 6,173 | 0 | 20 | 31608,8878 |
| 2 | 20 | -637874,61 | 12,7815 | 2 | 0 | 5,2185 | 20 | 30165,49807 |
| 3 | 20 | -2459917 | 11,827 | 0 | 6,173 | 2 | 20 | 35306,96875 |
| 4 | 20 | 321174,975 | 0 | 2 | 9,9044 | 8,0956 | 20 | 28079,92731 |

Berdasarkan tabel 6 untuk simulasi beban 20 MW kombinasi 3-unit konsumsi bahan bakar yang paling sedikit adalah kombinasi unit 2,3 dan 4 dengan nilai konsumsi bahan bakarnya 28383,0744 Kg/Jam dengan daya optimal $P_2 = 2$ MW, $P_3 = 8,3593$ MW dan $P_4 = 4,6407$ MW.

hasil simulasi dengan beban 25 MW dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 7 Economic dispatch 3-unit beroperasi dengan simulasi beban 25 MW

| No | Beban (MW) | λ (kCal/MWh) | P1 (MW) | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P Total | Konsumsi Bahan Bakar (Kg/Jam) |
|----|------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|
| 1 | 25 | 220185,335 | 13,2311 | 2 | 9,7689 | 0 | 25 | 30275,7142 |
| 2 | 25 | 567773,303 | 13,4132 | 2,7515 | 0 | 8,8353 | 25 | 30214,40549 |
| 3 | 25 | -970350,48 | 12,6073 | 0 | 8,1716 | 4,2211 | 25 | 33463,23985 |
| 4 | 25 | 953237,916 | 0 | 4,2558 | 10,7525 | 9,9917 | 25 | 28853,01743 |

Berdasarkan tabel 7 untuk simulasi beban 25 MW kombinasi 3-unit konsumsi bahan bakar yang paling sedikit adalah kombinasi unit 2,3 dan 4 dengan nilai konsumsi bahan bakarnya 28079,92731 Kg/Jam dengan daya optimal $P_2 = 2$ MW, $P_3 = 9,9044$ MW dan $P_4 = 8,0956$ MW.

hasil simulasi dengan beban 30 MW dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 8 Economic dispatch 3-unit beroperasi dengan simulasi beban 30 MW

| No | Beban (MW) | λ (kCal/MWh) | P1 (MW) | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P Total | Konsumsi Bahan Bakar (Kg/Jam) |
|----|------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|
| 1 | 30 | 1191893,31 | 13,7401 | 5,1872 | 11,0727 | 0 | 30 | 31175,05765 |
| 2 | 30 | 1241044,66 | 13,7659 | 5,379 | 0 | 10,8551 | 30 | 31291,08285 |
| 3 | 30 | 57284,5912 | 13,1457 | 0 | 9,5504 | 7,3039 | 30 | 32919,74825 |
| 4 | 30 | 1559722,19 | 0 | 6,6227 | 11,5662 | 11,8111 | 30 | 30348,82701 |

Berdasarkan tabel 8 untuk simulasi beban 30 MW kombinasi 3-unit konsumsi bahan bakar yang paling sedikit adalah kombinasi unit 2,3 dan 4 dengan nilai konsumsi bahan bakarnya 30348,82701 Kg/Jam dengan daya optimal $P_2 = 6,6227$ MW, $P_3 = 11,5662$ MW dan $P_4 = 11,8111$ MW. Hasil simulasi dengan beban 35 MW dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 9 Economic dispatch 3-unit beroperasi dengan simulasi beban 35 MW

| No | Beban (MW) | λ (kCal/MWh) | P1 (MW) | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P Total | Konsumsi Bahan Bakar (Kg/Jam) |
|----|------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|
| 1 | 35 | 2058716,09 | 14,1943 | 8,57 | 12,2357 | 0 | 35 | 33109,94419 |
| 2 | 35 | 1914316,01 | 14,1186 | 8,0065 | 0 | 12,8749 | 35 | 33169,27373 |
| 3 | 35 | 1084919,67 | 13,6841 | 0 | 10,9292 | 10,3868 | 35 | 33599,65756 |
| 4 | 35 | 2166206,46 | 0 | 8,9895 | 12,3799 | 13,6305 | 35 | 32566,5901 |

Berdasarkan tabel 9 untuk simulasi beban 35 MW kombinasi 3-unit konsumsi bahan bakar yang paling sedikit adalah kombinasi unit 2,3 dan 4 dengan nilai konsumsi bahan bakarnya 32566,5901 Kg/Jam dengan daya optimal $P_2 = 8,9895$ MW, $P_3 = 12,3799$ MW dan $P_4 = 13,6305$ MW. Hasil simulasi dengan beban 35 MW dapat dilihat pada tabel 10.

Tabel 10 Economic dispatch 3-unit beroperasi dengan simulasi beban 35 MW

| No | Beban (MW) | λ (kCal/MWh) | P1 (MW) | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P Total | Konsumsi Bahan Bakar (Kg/Jam) |
|----|------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|
| 1 | 40 | 2925538,87 | 14,6484 | 11,9529 | 13,3987 | 0 | 40 | 36076,76262 |
| 2 | 40 | 2587587,37 | 14,4713 | 10,634 | 0 | 14,8947 | 40 | 35848,97812 |
| 3 | 40 | 2112554,74 | 14,2225 | 0 | 12,3079 | 13,4696 | 40 | 35502,89031 |
| 4 | 40 | 2858491,21 | 0 | 11,6912 | 13,3088 | 15 | 40 | 35519,09207 |

Economic dispatch dengan studi kasus 2-unit beroperasi dengan simulasi 10 MW sampai

25 MW. Pada studi kasus ini terdapat enam kemungkinan kombinasi terjadi, yaitu kombinasi unit 1 dan 2 beroperasi, kombinasi unit 1 dan 3 beroperasi, kombinasi unit 1 dan 4 beroperasi, kombinasi unit 2 dan 3 beroperasi, kombinasi unit 2 dan 4 beroperasi, dan terakhir kombinasi unit 3 dan 4 beroperasi. Hasil simulasi untuk beban 10 MW dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 11 Economic dispatch 2-unit beroperasi dengan simulasi beban 10 MW

| No | Beban (MW) | λ (kCal/MWh) | P1 (MW) | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P Total | Konsumsi Bahan Bakar (Kg/Jam) |
|----|------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|
| 1 | 10 | -9764760 | 8 | 2 | 0 | 0 | 10 | 25805,21 |
| 2 | 10 | -9764760 | 8 | 0 | 2 | 0 | 10 | 33684,04 |
| 3 | 10 | -9764760 | 8 | 0 | 0 | 2 | 10 | 29503,29 |
| 4 | 10 | -1098240 | 0 | 2 | 8 | 0 | 10 | 18082,80 |
| 5 | 10 | 289320 | 0 | 2 | 0 | 8 | 10 | 17649,90 |
| 6 | 10 | -1521444,34 | 0 | 0 | 7,4322 | 2,5678 | 10 | 21739,48 |

Berdasarkan tabel 11 untuk simulasi beban 10 MW kombinasi 2-unit konsumsi bahan bakar yang paling sedikit adalah kombinasi unit 2 dan unit 3 dengan nilai konsumsi bahan bakarnya 17649,90 Kg/Jam dengan daya optimal $P_2 = 2$ MW dan $P_3 = 8$ MW.

Hasil simulasi untuk beban 15 MW dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 12 Economic dispatch 2-unit beroperasi dengan simulasi beban 15 MW

| No | Beban (MW) | λ (kCal/MWh) | P1 (MW) | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P Total | Konsumsi Bahan Bakar (Kg/Jam) |
|----|------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|
| 1 | 15 | -220860 | 13 | 2 | 0 | 0 | 15 | 19861,39 |
| 2 | 15 | -4067978,36 | 10,9845 | 0 | 4,0155 | 0 | 15 | 26456,72 |
| 3 | 15 | -1489219,84 | 12,3355 | 0 | 0 | 2,6645 | 15 | 23441,61 |
| 4 | 15 | 951657,89 | 0 | 4,2496 | 10,7504 | 0 | 15 | 18390,16 |
| 5 | 15 | 1062252,9 | 0 | 4,6812 | 0 | 10,3188 | 15 | 18481,83 |
| 6 | 15 | -369807,26 | 0 | 0 | 8,9773 | 6,0227 | 15 | 20613,73 |

Berdasarkan tabel 12 untuk simulasi beban 15 MW kombinasi 2-unit konsumsi bahan bakar yang paling sedikit adalah kombinasi unit 2 dan unit 3 dengan nilai konsumsi bahan bakarnya 18390,16 Kg/Jam dengan daya optimal $P_2 = 4,2496$ MW dan $P_3 = 10,7504$ MW. Hasil simulasi untuk beban 20 MW dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 13 Economic dispatch 2-unit beroperasi dengan simulasi beban 20 MW

| No | Beban (MW) | λ (kCal/MWh) | P1 (MW) | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P Total | Konsumsi Bahan Bakar (Kg/Jam) |
|----|------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|
| 1 | 20 | 1434226,52 | 13,8671 | 6,1329 | 0 | 0 | 20 | 20876,90 |
| 2 | 20 | -1387876,05 | 12,3886 | 0 | 7,6114 | 0 | 20 | 23209,18 |
| 3 | 20 | -703111,11 | 13,0789 | 0 | 0 | 6,9211 | 20 | 22513,32 |
| 4 | 20 | 1905074,55 | 0 | 7,9704 | 12,0296 | 0 | 20 | 20090,60 |
| 5 | 20 | 1786624,84 | 0 | 7,5082 | 0 | 12,4918 | 20 | 20177,59 |
| 6 | 20 | 781829,80 | 0 | 0 | 10,5225 | 9,4775 | 20 | 20858,99 |

Berdasarkan tabel 13 untuk simulasi beban 20 MW kombinasi 2-unit konsumsi bahan bakar yang paling sedikit adalah kombinasi unit 2 dan unit 3 dengan nilai konsumsi bahan bakarnya 20090,60 Kg/Jam dengan daya optimal $P_2 = 7,9704$ MW dan $P_3 = 12,0296$ MW.

Hasil simulasi untuk beban 25 MW dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 14 Economic dispatch 2-unit beroperasi dengan simulasi beban 25 MW

| No | Beban (MW) | λ (kCal/MWh) | P1 (MW) | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P Total | Konsumsi Bahan Bakar (Kg/Jam) |
|----|------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|
| 1 | 25 | 2563790,65 | 14,4589 | 10,5411 | 0 | 0 | 25 | 23256,68 |
| 2 | 25 | 1292226,26 | 13,7927 | 0 | 11,2073 | 0 | 25 | 23152,25 |
| 3 | 25 | 1348597,60 | 13,8222 | 0 | 0 | 11,1778 | 25 | 23274,21 |
| 4 | 25 | 2858491,20 | 0 | 11,6912 | 13,3088 | 0 | 25 | 22926,05 |
| 5 | 25 | 2510996,78 | 0 | 10,3351 | 0 | 14,6649 | 25 | 22735,70 |
| 6 | 25 | 1933466,87 | 0 | 0 | 12,0677 | 12,9323 | 25 | 22475,23 |

Berdasarkan tabel 14 untuk simulasi beban 25 MW kombinasi 2-unit konsumsi bahan bakar yang paling sedikit adalah kombinasi unit 3 dan unit 4 dengan nilai konsumsi bahan bakarnya 22475,23 Kg/Jam dengan daya optimal $P_3 = 12,0677$ MW dan $P_4 = 12,9323$ MW.

IV. KESIMPULAN

1. Dari hasil perhitungan menentukan karakteristik input output PLTU Bolok menggunakan metode *least square* menghasilkan persamaan karakteristik input output sebagai berikut:

Unit 1 yaitu PLTU Bolok 1:

$$I_1 = 2,1615 \times 10^8 - 2,5035 \times 10^7 P_1 + 9,5439 \times 10^5 P_1^2$$

Unit 2 yaitu PLTU Bolok 2:

$$I_2 = 3,1193 \times 10^7 - 0,0137 \times 10^7 P_2 + 0,0128 \times 10^7 P_2^2$$

Unit 3 yaitu PLTU Kupang Baru 1:

$$I_3 = 7,7153 \times 10^7 - 0,7061 \times 10^7 P_3 + 0,0373 \times 10^7 P_3^2$$

Unit 4 yaitu PLTU Kupang Baru 2:

$$I_4 = 3,1193 \times 10^7 - 0,0137 \times 10^7 P_4 + 0,0128 \times 10^7 P_4^2$$

2. Penjadwalan yang paling optimum dengan simulasi beban 10 MW sampai 55 MW adalah:

- a. Untuk beban 10 MW sampai 25 MW penjadwalan yang optimum adalah kombinasi 2-unit beroperasi. Untuk simulasi 10 MW penjadwalan optimum adalah kombinasi unit 2 dan 3 beroperasi, kemudian untuk 15 MW penjadwalan optimum adalah kombinasi unit 2 dan 3 beroperasi, selanjutnya simulasi 20 MW penjadwalan optimum adalah kombinasi unit 2 dan 3 beroperasi dan simulasi 25 MW penjadwalan optimum adalah kombinasi unit 3 dan 4 beroperasi.
- b. Untuk beban 30 MW sampai 40 MW penjadwalan yang optimum adalah kombinasi 3-unit beroperasi. Penjadwalan optimum untuk simulasi 30 MW adalah kombinasi unit 2, 3 dan 4 beroperasi, kemudian penjadwalan optimum untuk simulasi 35 MW adalah kombinasi unit 2, 3 dan 4 beroperasi dan terakhir penjadwalan optimum untuk simulasi 1, 3 dan 4 beroperasi.
- c. Untuk beban 45 MW sampai 55 MW penjadwalan yang optimum adalah kombinasi 4-unit beroperasi. Untuk simulasi beban 45 MW penjadwalan optimum adalah unit 1 = 13,9966 MW, unit 2 = 7,0976 MW, unit 3 = 11,7295 MW dan unit 4 = 12,1763 MW, kemudian untuk simulasi beban 50 MW penjadwalan optimum adalah unit 1 = 14,2954 MW, unit 2 = 9,3231 MW, unit 3 = 12,4946 MW dan unit 4 = 13,887 MW dan terakhir untuk simulasi beban 55 MW penjadwalan optimum adalah unit 1 =

- 14,6484 MW, unit 2 = 11,9529 MW, unit 3 = 13,3987 MW dan unit 4 = 15 MW.
3. Perbandingan dengan data dispatcher di Blok dengan beban yang sama dapat disimpulkan untuk beban 56,4 MW penjadwalan optimum adalah $P1 = 14,8317$ MW, $P2 = 12,7$ MW, $P3 = 13,8683$ MW, $P4 = 15$ MW dengan konsumsi bahan bakarnya 49689,20578 Kg/Jam. Untuk beban 55,3 MW penjadwalan optimum adalah $P1 = 14,6756$ MW, $P2 = 12,1559$ MW, $P3 = 13,4685$ MW, $P4 = 15$ MW dengan konsumsi bahan bakarnya 48880,62287 Kg/Jam. Untuk beban 53,4 MW penjadwalan optimum adalah $P1 = 14,5031$ MW, $P2 = 10,8704$ MW, $P3 = 13,0266$ MW, $P4 = 15$ MW dengan konsumsi bahan bakarnya 47608,2053Kg/Jam.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Marsudi, Operasi Sistem Tenaga Listrik, Jakarta: ISTN, 2006.
- [2] A. Wood and B. Wollenberg, Power generation operation and control, New York: John weley & Sons, 1996.
- [3] K. Syah, H. S. Dachlan, R. N. Hasanah and M. Shidiq, "Analisis Perbandingan Economic Dispatch Pembangkit menggunakan Metode Lagrange dan CFPSO," *Jurnal EECCIS Vol.6*, 2012.
- [4] Adrianti, "Penjadwalan Ekonomis Pembangkit Thermal Dengan Memperhitungkan Rugi-rugi Saluran Transmisi Menggunakan Metode Algoritma Genetik," *Teknika No.33 Vol.1 Thn.XVII*, 2010.
- [5] A. Basuki, Bahan Ajar Metode Least Squart, Surabaya: Politeknik Elektronik Negeri Surabaya, 2014.
- [6] C. Cekdin, Sistem Tenaga Listrik contoh soal dan penyelesaiannya menggunakan matlab, Yogyakarta: ANDI, 2007.
- [7] K. Gangadhar, Electric Power System Analysis, Stability & Protection, Romesh Chander Khanna for KHANNA PUBLISHERS, 2001.
- [8] A. E.-b. GH. Stags, Computer Methods In Power System Analysis, New York: Mc. Hill, 1988.
- [9] T. Gonen, Electrical Power Distribution Sistem engineering, Mc Graw-Hill Company, 1986.
- [10] N. Harun, Bahan Ajar Perancangan Pembangkit tenaga Listrik, Makassar: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, 2011.
- [11] R. N. Marifah, Y. Mulyadi and A. G. Abdullah, "Operasi Ekonomis Pembangkit Thermal Sistem 500 Kv Jawa-Bali Dengan Pendekatan Algoritma Fuzzy Logic," *ELECTRANS, VOL.12, NO.2*, 2013.
- [12] D. Marsudi, Pembangkit Energi listrik, Jakarta: PENERBIT ERLANGGA, 2006.
- [13] H. Nabila, Analisis Economic Dispatch Pada PLTU Sektor Bukit Asam Menggunakan Metode Iterasi Lambda dan Dynamic Programming, Bandar Lampung: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung, 2017.
- [14] H. Saadat, Power System Analysis, New York: McGraw-Hill, 2004.
- [15] S. S. G. Sivaraganaju, Power System Operation and Control, India: Dorling Kindersley (India) Pvt. Ltd., 2010.
- [16] G. L. Thompson, An Optimisation Model for Planning Radial Sistem Distribution

- Network, IEEE Transaction on Power Apparatus and System, 1979.
- [17] M. Tuegeh, A. Soeprijanto and M. H. P, "Optimal Generator Scheduling Based On Particle Swarm Optimization," *Seminar Nasional Informatika 2009 (semnasIF 2009) UPN "Veteran" Yogyakarta*, 2009.
- [18] A. Yulianto, B. Winardi and K. , "Optimasi Economic Dispatch Pada Unit Pembangkit PLTU Tanjung Jati B Menggunakan Metode Sine Cosine Algorithm," *TRANSIENT, VOL. 6, NO. 4*, 2017.
- [19] Yulisman, "Perancangan Perangkat Lunak Untuk Pembebanan Optimal dan Biaya Bahan Bakar Stasiun Pembangkit," *MENARA Ilmu Vol. X Jilid 2 No.73*, 2016.