

OPTIMASI BIAYA BAHAN BAKAR PEMBANGKIT *THERMAL* AREA JAWA TENGAH DAN DIY BERBASIS LOGIKA *FUZZY*

Moh. Sabiqul Faiz¹⁾, Achmad Solichan²⁾, Luqman Assaffat³⁾

^{1), 2), 3)} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Semarang
Jl. Kasipah No. 12 Semarang
Email: faiz.svans@gmail.com

Abstrak

Penjadwalan operasi dan pembagian beban yang tepat pada proses pembangkitan tenaga listrik berguna untuk meminimalkan pengeluaran biaya bahan bakar. Dari simulasi operasi unit pembangkit *thermal* area Jateng dan DIY dengan sampel beban 2496 MW, 3850 MW, dan 4392 MW, metode iterasi lambda menghasilkan daya total pembangkitan yang sama besar dengan kebutuhan beban, sehingga nilai *error* 0%. Sedangkan pada metode logika *fuzzy* memiliki nilai *error* yang juga bagus, yaitu berturut-turut pada kondisi beban tersebut adalah 0,72%, 0,01%, dan 0,03%. Deviasi pembagian beban menggunakan iterasi lambda dengan logika *fuzzy* juga menunjukkan nilai yang bagus, yaitu pada beban 2496 MW = 6,58%, 3850 MW = 4,39%, sedangkan pada beban 4392 MW mencapai 17,23% atau buruk. Perbedaan daya total pembangkitan metode iterasi dengan *fuzzy*, membuat perbandingan efisiensi kedua metode tersebut tidak dapat dilakukan. Oleh karena itu, analisis dilakukan dari efektifitas kedua metode tersebut. Selain itu, diperlukan juga pembahasan lebih detail mengenai pembagian beban menggunakan metode logika *fuzzy*, baik dari sisi variabel *input*-*output*, fungsi keanggotaan, maupun aturan *fuzzy*.

Kata Kunci: Logika *Fuzzy*, Iterasi Lambda, Optimasi Pembangkit *Thermal*

Abstract

Correctly technics of Unit Commitment and Economic Load Dispatch in the power generation process will be minimizing fuel cost. From the simulation of thermal generating units at Jateng and DIY Electric System on load samples 2496 MW, 3850 MW, and 4392 MW, Lambda-Iteration Method produce the total power of generating is equally with load demand, so the error value is 0%. Whereas Fuzzy Logic Method has error value as good as Lambda-Iteration Method, by the error value of the load samples continuously are 0,72%, 0,01%, and 0,03%. The deviation of load dispatch using Lambda-Iteration and Fuzzy Logic is show a good value, by the load 2496 MW = 6,58%, 3850 MW = 4,39%, and on the load 4392 MW is 17,23% or bad value. Inequality of total power generating using Lambda-Iteration Method and Fuzzy Logic Method will make comparison of efficiency thermal generating units using the both methods is impossible to do. Because of that, the analysis will getting from the effectivity of the both methods. Another of that, needed more a discussion about economic load dispatch using Fuzzy Logic Method, either input-output variable, membership function, or rule of fuzzy.

Keywords: *Fuzzy* Logic, Lambda-Iteration, Optimization of Thermal Generating.

1. PENDAHULUAN

Optimasi pembangkit tenaga listrik merupakan proses pembangkitan tenaga listrik yang optimal dan biaya bahan bakar minimal, sehingga diperoleh sistem pembangkitan yang efisien. Biaya operasi pusat listrik sebagian besar ($\pm 60\%$) dialokasikan untuk biaya bahan bakar (Marsudi, 2011). Besarnya alokasi biaya bahan bakar tersebut membuat pentingnya usaha untuk efisiensi pengeluaran biaya bahan bakar.

Beban listrik merupakan variabel yang besarnya bergantung kepada konsumen, sehingga beban selalu mengalami fluktuasi. Sedangkan menurut Solichan dan Prasetyo (2013) untuk mendapat kuantitas daya sistem diperlukan pengoperasian unit pembangkit sebanyak mungkin. Oleh Karena itu, dalam sistem

dengan pembangkit banyak (interkoneksi), fluktuasi beban akan membuat terjadinya penjadwalan operasi oleh pembangkit-pembangkit dalam sistem tersebut.

Simulasi optimasi unit pembangkitan *thermal* area Jateng dan DIY pada penelitian ini dilakukan dengan kondisi beban adalah 2496 MW, 3850 MW, dan 4392 MW. Perhitungan dilakukan dengan mengabaikan faktor rugi transmisi dan keadaan gangguan.

1.1. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini diantaranya adalah, mengetahui karakteristik unit-unit pembangkit *thermal* area Jateng dan DIY, melakukan simulasi operasi unit pembangkit *thermal* sistem Jateng dan DIY menggunakan metode iterasi lambda dan logika *fuzzy*,

mengetahui karakteristik dari kedua metode tersebut dan membandingkan hasil perhitungannya.

2. TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Pada perhitungan penjadwalan unit pembangkit *thermal* sistem Minahasa menggunakan metode iterasi lambda didapatkan biaya pembangkitan sebesar Rp. 369.533.914,578, sedangkan real system adalah sebesar Rp. 438.958.267,8 (Angdrie dkk., 2012). Kemudian dari Federal University of Technology, Nigeria, metode pembagian beban dengan teknik iterasi lambda lebih disarankan daripada metode algoritma (Dike dkk., 2013).

Keefektifan penggunaan metode *fuzzy logic* (logika *fuzzy*) untuk efisiensi biaya bahan bakar unit pembangkit *thermal* sistem Jawa-Bali adalah sebesar 23,27 % (Marifah dkk., 2013). Kemudian dari sebuah penelitian lain juga menyimpulkan bahwa optimasi unit pembangkit menggunakan metode logika *fuzzy* lebih efisien 10,29% dibandingkan dengan metode dynamic programming (Abu-Jasser, 2012).

Penelitian oleh Kaur dan Dhaliwal (2012) menunjukkan bahwa optimasi unit pembangkit dengan metode logika *fuzzy* menghasilkan biaya bahan bakar sebesar 4978,31 Rs, sedangkan neural network 7328.45 Rs, dan conventional dynamic 8231.64 Rs.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Persamaan Biaya Bahan Bakar

Persamaan *Input-output* adalah sebagai berikut (Wood dan Wollenberg, 1996):

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

Dengan: $H_i(P_i)$ = *input* laju panas (MBtu/h)
 P_i = daya keluaran (MW)
 a_i, β_i, γ_i = koefisien biaya operasi pembangkit
 i = 1, 2, 3,....., n (pembangkit)

Untuk menentukan persamaan *input-output* unit pembangkit diperlukan data karakteristik pembangkit seperti, laju panas dan daya pembangkitan. Data-data tersebut kemudian diolah dengan pendekatan fungsi polinomial (Sofyan dkk., 2010).

$$\sum H_i = n.a_i + \beta_i \sum P_i + \gamma_i \sum P_i^2$$

$$\sum P_i H_i = a_i \sum P_i + \beta_i \sum P_i^2 + \gamma_i \sum P_i^3$$

$$\sum P_i^2 H_i = a_i \sum P_i^2 + \beta_i \sum P_i^3 + \gamma_i \sum P_i^4$$

(2)

Dari Persamaan (1) jika dikalikan dengan biaya bahan bakar maka akan didapatkan persamaan biaya bahan bakar (F_i) (Wood dan Wollenberg, 1996).

$$F_i(P_i) = a_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (3)$$

2.2.2. Metode Iterasi Lambda

Lambda pada penelitian ini ditentukan menggunakan persamaan sebagai berikut (Saadat, 1999):

$$\lambda = \frac{P_D + \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{2\gamma_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\gamma_i}} \quad (4)$$

P_D merupakan nilai beban. Kemudian pembagian beban dilakukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_i = \frac{\lambda + \beta_i}{2\gamma_i} \quad (5)$$

Ketika terjadi kondisi pembebanan di luar dari batasan daya unit, maka proses iterasi akan terus dilakukan dengan *setting* daya pembangkitan berada pada batasan daya unit pembangkit, dan besaran daya total pembangkitan sama dengan kebutuhan beban ($\sum P_i = P_D$). Persamaan-persamaan yang digunakan dalam proses iterasi lambda adalah (Saadat, 1999):

$$\Delta P^{(k)} = P_D - \sum P_i \quad (6)$$

$$\Delta \lambda^{(k)} = \frac{\Delta P^{(k)}}{\sum \frac{1}{2\gamma_i}} \quad (7)$$

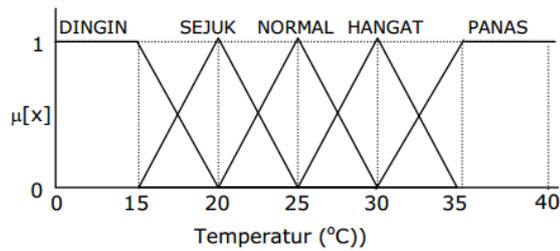
$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \Delta \lambda^{(k)} \quad (8)$$

Koefisien $\lambda^{(k+1)}$ merupakan nilai lambda setelah dilakukan iterasi. Proses iterasi lambda akan terus berlangsung hingga nilai $\Delta P = 0$.

2.2.3. Metode Logika fuzzy

Konsep tentang logika *fuzzy* diperkenalkan oleh Prof. Lotfi Astor Zadeh pada 1962. Logika *fuzzy* merupakan logika kesamaran, yang memiliki interval nilai kebenaran antara 0 - 1. Setiap variabel *input-output* memiliki atribut linguistik dan numeris.

Pembentukan himpunan *fuzzy* dilakukan pada fungsi keanggotaan dari variabel *input* dan *output*. Interval nilai yang terdapat dalam fungsi keanggotaan adalah antara 0 - 1, dan besar nilainya tergantung pada bobot keanggotaan yang dimilikinya.



Gambar 1. Himpunan *fuzzy* pada variabel temperatur.
 (Kusumadewi dan Hartati, 2010)

Gambar 1. merupakan contoh pembuatan variabel *fuzzy* beserta dengan himpunannya. Kondisi seperti dingin adalah atribut linguistik sebagai gambaran dari atribut numeris.

Pendeklarasian aturan *fuzzy* menggunakan fungsi IF-THEN, dengan operator *fuzzy* yang dapat digunakan adalah AND untuk nilai derajat keanggotaan terkecil, OR untuk nilai derajat keanggotaan tertinggi, dan NOT sebagai fungsi komplemen.

Tahap akhir adalah penegasan (defuzzifikasi), yaitu proses pendeskripsian aturan-aturan *input* terhadap *output*nya. Metode untuk defuzzifikasi yang sering digunakan adalah Centroid (*Composite Moment*) dan MoM (*Mean of Maximum*).

2.2.4. Rasio Error Logika Fuzzy

Rasio *error* logika *fuzzy* dinyatakan sebagai ketidaktepatan hasil operasi logika *fuzzy* terhadap data actual. Untuk menyatakan rasio *error* maka dapat digunakan rumusan MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*). Jika X_i merupakan data *actual*, sedangkan Y_i adalah prakiraan atau *output* logika *fuzzy*, maka rasio *error* dinyatakan sebagai berikut.

$$MAPE = \frac{\sum \frac{|X_i - Y_i|}{X_i}}{n} \times 100 \quad (9)$$

Dengan, n = jumlah data

3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian adalah dengan studi literatur atau kajian pustaka, serta bimbingan dari tenaga ahli untuk penyelesaian masalah optimasi unit pembangkit *thermal* Jateng dan DIY menggunakan metode iterasi lambda dan metode logika *fuzzy*.

Konsep pada penelitian ini adalah simulasi pembagian beban dan penjadwalan operasi unit pembangkit menggunakan metode iterasi lambda dan logika *fuzzy*. Data yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari PT PLN (PERSERO) P2B dan PLTGU Indonesia Power UP Semarang.

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Karakteristik Biaya Bahan Bakar

Persamaan biaya bahan bakar diketahui dari perkalian antara persamaan *input-output* dengan harga bahan bakar. Persamaan *input-output* dicari dengan mengolah data *heatrate* pembangkit *thermal* Jateng dan DIY menggunakan metode polinomial (persamaan 2).

Tabel 1. Persamaan biaya bahan bakar unit pembangkit *thermal* Jateng dan DIY

Units	Persamaan <i>Input-output</i>
STG10	$F_1 = 37325167,89 + 906194,59 P_1 + 1372,84 P_1^2$
GTG11	$F_2 = 43370416,78 + 573039 P_2 + 1088,31 P_2^2$
GTG12	$F_3 = 440138584,79 - 2435996,19 P_3 + 6721,06 P_3^2$
GTG13	$F_4 = -3525260,64 + 1196395,24 P_4 - 352,27 P_4^2$
STG20	$F_5 = 2283792,93 + 1323340,11 P_5 - 1734,24 P_5^2$
GTG21	$F_6 = 26873295,25 + 719477,79 P_6 + 1434,23 P_6^2$
GTG22	$F_7 = 52247504,33 + 669820,74 P_7 + 617,34 P_7^2$
GTG23	$F_8 = 47859198,39 + 769041,83 P_8 + 169,89 P_8^2$
RBG1	$F_9 = 24448726,82 + 262802,39 P_9 + 16,35 P_9^2$
RBG2	$F_{10} = 24448726,82 + 262802,39 P_{10} + 16,35 P_{10}^2$
CLCP1	$F_{11} = 10340167,70 + 349525,46 P_{11} + 42,58 P_{11}^2$
CLCP2	$F_{12} = 10340167,70 + 349525,46 P_{12} + 42,58 P_{12}^2$
TJATI1	$F_{13} = 8370762,24 + 312517,01 P_{13} - 53,28 P_{13}^2$
TJATI2	$F_{14} = 8370762,24 + 312517,01 P_{14} - 53,28 P_{14}^2$
TJATI3	$F_{15} = 31893468,35 + 194390,42 P_{15} + 73,83 P_{15}^2$
TJATI4	$F_{16} = 31893468,35 + 194390,42 P_{16} + 73,83 P_{16}^2$

4.2. Optimasi Unit Pembangkit Thermal Menggunakan Metode Iterasi Lambda

Nilai lambda pada penelitian ini ditentukan menggunakan persamaan 4. Batasan daya maksimal dan minimal akan membuat adanya proses iterasi. Berikut contoh pembagian beban menggunakan iterasi lambda pada beban 2496 MW.

$$\lambda_1 = \frac{2496 + 22441,38}{0,0827} = 301449,4838 \text{ Rp/MW-jam}$$

$$\text{Maka, } P_1 = \frac{301449,4838 - 906194,59}{1372,84} = -220,25$$

Dengan cara yang sama, P_2, P_3, \dots, P_{16} dapat diketahui, sehingga P total ($\sum P$) juga dapat diketahui.

$$\begin{aligned} \sum P &= P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + \dots + P_{16} \\ &= (-220,25) + (-124,78) + 203,65 + 1270,25 + \\ &\quad 294,62 + (-145,73) + (-298,36) + (-1376,13) + \end{aligned}$$

$$1182,03 + 1182,03 + (-564,59) + (-564,59) + 103,87 + 103,87 + 725,06 + 725,06 = 2496 \text{ MW}$$

Hasil perhitungan dengan daya pembangkitan di atas batas maksimal, akan disetting pada batasan maksimal.

$$\begin{aligned} \sum P &= (-220,25) + (-124,78) + 97 + 97 + 294,62 + (-145,73) + (-298,36) + (-1376,13) + 280 + 280 + (-564,59) + (-564,59) + 103,87 + 103,87 + 661,1 + 661,1 \\ &= -715,88 \text{ MW} \end{aligned}$$

Sehingga, $\Delta P^{(k)} = 2496 - (-715,88) = 3211,88 \text{ MW}$

$$\Delta \lambda = \frac{3211,88}{0,009354} = 343351,7$$

$$\lambda_2 = 301449,4838 + 343351,7 = 644801,19$$

Kemudian pada iterasi kedua:

$$\begin{aligned} \sum P &= (-95,20) + 32,97 + 97 + 97 + 195,63 + (-26,03) + (-20,26) + (-365,64) + 280 + 280 + 3467,66 + 3467,66 + (-3118,49) + (-3118,49) + 661,1 + 661,1 \\ &= 2496 \text{ MW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum P &= 93,12 + 0 + 97 + 97 + 0 + 0 + 0 + 0 + 280 + 280 + 3467,66 + 3467,66 + 0 + 0 + 661,1 + 661,1 \\ &= 9104,64 \text{ MW} \end{aligned}$$

$$\Delta P^{(k)} = 2496 - 9104,64 = -6608,64 \text{ MW}$$

$$\Delta \lambda = \frac{-6608,64}{0,023488} = -281367,1074$$

$$\lambda_2 = 644801,19 + (-281367,1074) = 363434,08$$

Kemudian pada iterasi ketiga:

$$\begin{aligned} \sum P &= 93,12 + 0 + 97 + 97 + 0 + 0 + 0 + 0 + 280 + 280 + 163,34 + 163,64 + 0 + 0 + 661,1 + 661,1 \\ &= 2496 \text{ MW} \end{aligned}$$

Untuk penamaan $P_1 - P_{16}$ adalah berurutan dari unit STG10 sampai TJATI4.

Tabel 2. Batasan Daya

Pembangkit	P _{maksimal}	P _{minimal}
STG10 (Tambak Lorok)	131	47
GTG11, 12, 13 (Tambak Lorok)	97	27
STG20 (Tambak Lorok)	142	47
GTG21, 22, 23 (Tambak Lorok)	100	27
REMBANG	280	75
CILACAP	282	75

Pembangkit	P _{maksimal}	P _{minimal}
TJATI 1 & 2 (Jepara)	660,8	182,5
TJATI 3 & 4 (Jepara)	660,8	182,5

Biaya bahan bakar diketahui dengan mensubstitusikan pembagian beban ke dalam persamaan pada Tabel 1.

Tabel 3. Biaya bahan bakar unit pembangkit *thermal* Jateng dan DIY

Units	P (MW)	F (Rp)
STG10	93,12	0
GTG11	0	0
GTG12	97	267.085.438,02
GTG13	97	109.210.562,65
STG20	0	0
GTG21	0	0
GTG22	0	0
GTG23	0	0
RBG1	280	99.315.064,53
RBG2	280	99.315.064,53
CLCP1	163,34	68.567.573,22
CLCP2	163,34	68.567.573,22
TJATI1	0	0
TJATI2	0	0
TJATI3	661,1	192.671.440,68
TJATI4	661,1	192.671.440,68
TOTAL	2496	1.097.404.157,53

Dengan cara yang sama, maka biaya pembangkitan untuk beban 3850 MW dan 4392 MW adalah:

Tabel 4. Persamaan biaya bahan bakar unit pembangkit *thermal* Jateng dan DIY

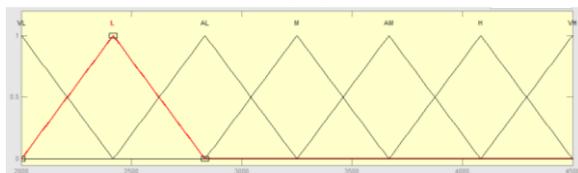
Units	P	F	P	F
STG10	93,12	0	131	0
GTG11	0	0	97	109.195.223,28
GTG12	97	267.085.438,02	97	267.085.438,02
GTG13	97	109.210.562,65	97	109.210.562,65
STG20	0	0	64,2	0
GTG21	0	0	40	57.947.173,27
GTG22	0	0	100	125.402.928,30
GTG23	0	0	0	0
RBG1	280	99.315.064,53	280	99.315.064,53
RBG2	280	99.315.064,53	280	99.315.064,53

Units	P	F	P	F
CLCP1	281	111.918.639,39	281	111.918.639,39
CLCP2	281	111.918.639,39	281	111.918.639,39
TJATI1	559,34	166.505.867,03	660,8	191.618.454,31
TJATI2	559,34	166.505.867,03	660,8	191.618.454,31
TJATI3	661,1	192.671.440,68	661,1	192.671.440,68
TJATI4	661,1	192.671.440,68	661,1	192.671.440,68
TOTAL	3850	1.517.118.023,92	4392	1.097.404.157,53

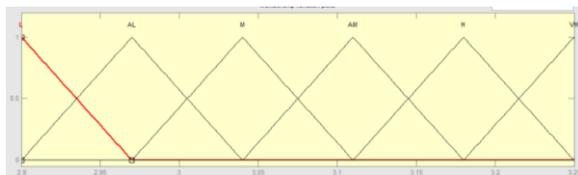
Biaya pembangkitan daya oleh STG = 0, dikarenakan STG hanya memanfaatkan gas buang dari GTG.

4.3. Optimasi Unit Pembangkit Thermal Menggunakan Metode Logika fuzzy

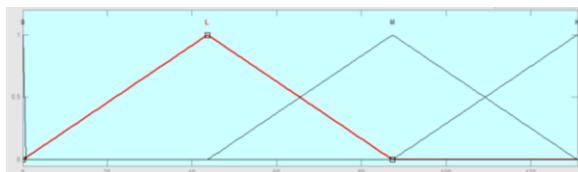
Variabel *input* terdiri atas kebutuhan beban (PD) dan nilai *incremental cost* (IC), sedangkan kapasitas generator yang akan dilakukan pembebanan adalah sebagai variabel *output*. Variabel-variabel tersebut kemudian didefinisikan dalam bentuk himpunan yang terdiri atas atribut linguistik dan numeris.



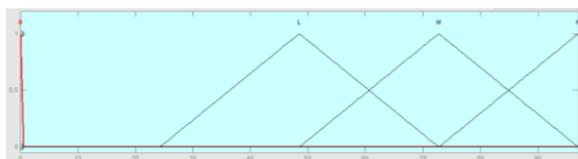
Gambar 2. Fungsi keanggotaan PD (2000 – 4500)



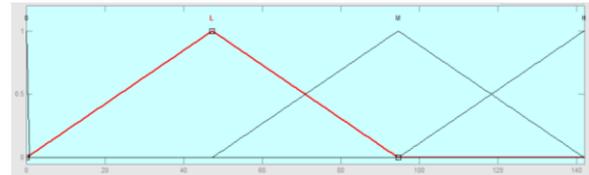
Gambar 3. Fungsi keanggotaan IC (290000 – 325000)



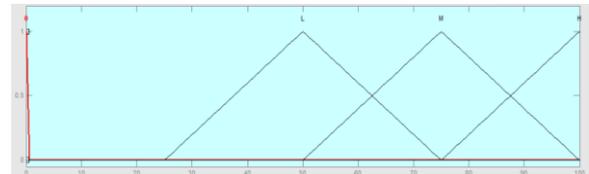
Gambar 4. Fungsi keanggotaan STG10 (0 – 131)



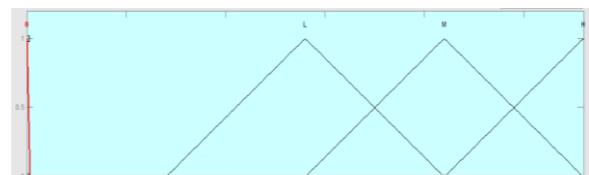
Gambar 5. Fungsi keanggotaan GTG11, GTG12, dan GTG13 (0 – 97)



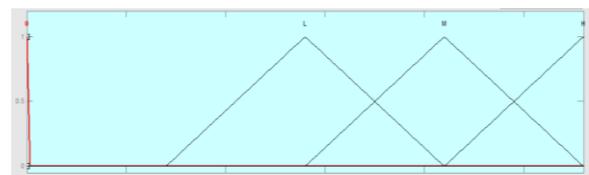
Gambar 6. Fungsi keanggotaan STG20 (0 – 142)



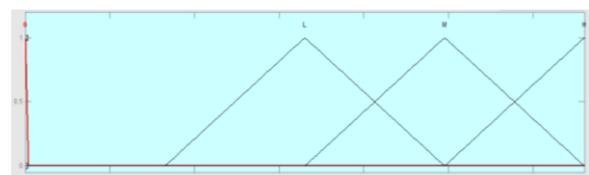
Gambar 7. Fungsi keanggotaan GTG21, GTG22, dan GTG23 (0 – 100)



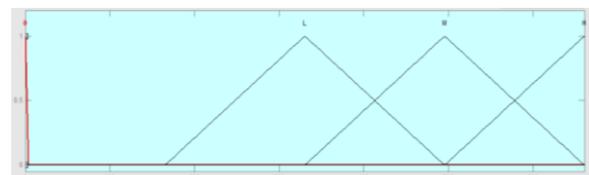
Gambar 8. Fungsi keanggotaan RBG1 dan RBG2 (0 – 280)



Gambar 9. Fungsi keanggotaan CLCP1 dan CLCP2 (0 – 281)



Gambar 10. Fungsi keanggotaan TJATI1 dan TJATI2 (0 – 660,8)



Gambar 11. Fungsi keanggotaan TJATI3 dan TJATI4 (0 – 661,1)

Pendefinisian dari kondisi linguistik variabel *input-output* adalah 0, VL, L, AL, M, AM, H, dan VH, yang secara berurutan adalah merepresentasikan keadaan *offline, very low, low, above of low, medium, above of medium, high, dan very high*.

Hubungan antara variabel *input* dan *output* dilakukan melalui pendeklarasian aturan-aturan yang berbentuk IF-THEN. Operasi yang digunakan untuk mengkombinasi himpunan *fuzzy* pada penelitian ini adalah operasi AND (\cap), dengan mengambil nilai keanggotaan terkecil dari operasi 2 himpunan.

$$\text{Daya total pembangkitan} = PD \cap IC \quad (9)$$

IF Beban total area Jateng dan DIY (.....) dan Karakteristik *incremental cost* (.....)
 THEN Daya total pembangkitan dari unit-unit generator (.....) (10)

Tabel 5. Aturan *Fuzzy*

No	Input		Output															
	IF	AND	THEN															
	PD	IC	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16
1	VL	L	L	0	0	H	H	0	0	0	0	H	H	0	0	0	H	H
2	VL	AL	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	M	0	0	0	H	H
3	L	AL	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	0	0	0	H	H
4	L	M	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	L	0	0	H	H
5	L	M	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	M	0	0	H	H
6	AL	AL	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	M	0	0	H	H
7	AL	M	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	H	0	0	H	H
8	AL	M	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	L	0	L	H	H
9	AL	AM	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	M	0	L	H	H
10	M	M	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	H	0	M	H	H
11	M	AM	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	H	0	M	H	H
12	M	AM	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	H	0	H	H	H
13	M	H	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	H	L	H	H	H
14	AM	AM	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	H	L	M	H	H
15	AM	AM	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	H	M	M	H	H
16	AM	H	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	H	H	H	H	H
17	AM	VH	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	H	H	H	H	H
18	H	AM	M	0	H	H	0	0	0	0	H	H	H	H	H	H	H	H
19	H	H	M	0	H	H	L	0	H	0	H	H	H	H	H	H	H	H
20	H	VH	H	H	H	H	M	M	H	0	H	H	H	H	H	H	H	H
21	VH	H	M	M	H	H	L	0	H	0	H	H	H	H	H	H	H	H
22	VH	VH	H	H	H	H	M	M	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H
23	VH	VH	H	H	H	H	M	M	H	M	H	H	H	H	H	H	H	H

Untuk aturan *fuzzy* (Tabel 5), unit G1 – G16 secara berurutan adalah penamaan STG10 sampai TJATI4. Aturan *fuzzy* didasarkan pada prioritas pembebanan dari metode iterasi lambda, yaitu PLTU Rembang, unit GTG 1.3 Tambak Lorok, PLTU Tanjung Jati unit 3 & 4, unit GTG 1.2 Tambak Lorok, PLTU Cilacap, PLTU Tanjung Jati unit 1 & 2, kemudian unit GTG 2.2, 1.1, 2.1, & 2.3 Tambak Lorok.

Metode defuzzifikasi yang digunakan adalah MoM (*Mean of maximum*). Hasil defuzzifikasi akan memunculkan pembagian beban sebagai berikut:

Tabel 6. Pembagian beban menggunakan metode logika *fuzzy*.

Units	P (2496)	P (3850)	P (4392)
STG10	87,12	87,77	125,76
GTG11	0	0	94,09
GTG12	92,64	92,15	94,09
GTG13	92,64	92,15	94,09
STG20	0	0	95,14

Units	P (2496)	P (3850)	P (4392)
GTG21	0	0	75
GTG22	0	0	97
GTG23	0	0	62,5
RBG1	267,4	266	271,6
RBG2	267,4	266	271,6
CLCP1	268,36	266,95	272,57
CLCP2	175,63	266,95	272,57
TJATI1	0	627,76	640,98
TJATI2	0	627,76	640,98
TJATI3	631,35	628,05	641,27
TJATI4	631,35	628,05	641,27
TOTAL	2513,89	3849,59	4390,51

Tabel 7. Biaya bahan bakar dari pembagian beban menggunakan metode logika *fuzzy*.

Units	F (2513,89)	F (3849,59)	F (4390,51)
STG10	0	0	0
GTG11	0	0	106.922.497,22
GTG12	272.149.202,06	272.734.267,41	270.436.792,57
GTG13	104.285.547,52	103.731.210,94	105.924.940,33
STG20	0	0	0
GTG21	0	0	88.901.667,42
GTG22	0	0	123.028.621,09
GTG23	0	0	96.587.959,12
RBG1	95.890.999,63	95.510.868,40	97.031.777,85
RBG2	95.890.999,63	95.510.868,40	97.031.777,85
CLCP1	107.204.995,93	106.680.029,46	108.773.456,34
CLCP2	73.040.608,87	106.680.029,46	108.773.456,34
TJATI1	0	183.561.088,12	186.798.969,60
TJATI2	0	183.561.088,12	186.798.969,60
TJATI3	184.049.636,69	183.101.320,50	186.910.014,55
TJATI4	184.049.636,69	183.101.320,50	186.910.014,55
TOTAL	1.116.561.627,02	1.514.172.091,3	1.9508.30.914,42

Error sebagai perbedaan daya pembangkitan dari metode iterasi lambda dan logika *fuzzy* terhadap kebutuhan beban dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Persentase *error* dan *error* rata-rata (MAPE) daya total pembangkitan pada iterasi lambda dan logika *fuzzy*

PD	Iterasi Lambda	Logika Fuzzy
2496	0%	0,72%
3850	0%	0,01%
4392	0%	0,03%
MAPE daya total	0%	0,25%

Tabel 9. Persentase deviasi antara iterasi lambda dengan logika *fuzzy*.

Units	Beban 2496 MW	Beban 3850 MW	Beban 4392 MW
STG10	6,44	5,75	4
GTG1 1	0	0	3
GTG1 2	4,49	5	3
GTG1 3	4,49	5	3
STG20	0	0	48,19

Units	Beban 2496 MW	Beban 3850 MW	Beban 4392 MW
GTG2 1	0	0	87,5
GTG2 2	0	0	3
GTG2 3	0	0	100
RBG1	4,5	5	3
RBG2	4,5	5	3
CLCP1	64,3	5	3
CLCP2	7,52	5	3
TJATI 1	0	12,23	2,999
TJATI 2	0	12,23	2,999
TJATI 3	4,5	4,999	2,9995
TJATI 4	4,5	4,999	2,9995
Rerata	6,58	4,39	17,23

Kondisi untuk persentase *error* dan deviasi dinyatakan bagus jika $< 10\%$, dan tidak bagus jika $> 10\%$. Pada Tabel 8, MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) dari iterasi lambda lebih baik jika dibandingkan dengan logika *fuzzy*. Sedangkan deviasi (selisih) daya pembangkitan masing-masing generator antara iterasi lambda dengan logika *fuzzy* adalah terlihat bagus pada beban 2496 MW dan 3850 MW, dan buruk pada beban 4392 MW.

4.4. Perbandingan Metode Iterasi Lambda dan Logika fuzzy

Tabel 10 di bawah ini memperlihatkan hasil perbandingan antara iterasi Lambda dengan Fuzzy Logic.

Tabel 10. Perbandingan hasil perhitungan iterasi lambda dan logika *fuzzy*

Logika fuzzy		Iterasi Lambda		Selisih
F	P	F	P	
1.116.561.627,02	2513,89	1.097.404.157,53	2496	19.157.469,49
1.514.172.091,3	3849,59	1.517.118.023,92	3850	-2.945.932,62
1.950.830.914,42	4390,51	1.859.888.523,34	4392	90.942.391,08

Dari Tabel 10, daya total pembangkitan antara metode iterasi lambda dan logika *fuzzy* berbeda, sehingga besar kecilnya biaya bahan bakar total tidak dapat dijadikan acuan efisiensi antara kedua metode tersebut.

Karakteristik metode iterasi lambda untuk optimasi unit pembangkit *thermal* diantaranya, pembagian beban didasarkan pada *incremental fuel rate* atau *incremental cost*. Pada metode iterasi lambda, hasil perhitungan memiliki tingkat keakuratan yang baik dikarenakan perhitungan dilakukan secara matematis.

Sedangkan pada metode logika *fuzzy* diperlukan pemodelan yang tepat untuk operasi pembagian beban, sehingga dibutuhkan beberapa kali percobaan. Karena pada logika *fuzzy* memiliki kesensitifan terhadap pendeklarasian variabel *input* dan *output*. Kesensitifan tersebut dikarenakan pengaruh bentuk kurva terhadap agregasi pada aturan *fuzzy*. Pada *range* yang semakin besar membutuhkan pendefinisian atribut linguistik yang semakin detail, terlebih jika sistem memiliki banyak variabel *input-output*.

Pada penelitian ini, selain prioritas pembebanan pada aturan *fuzzy* yang berdasarkan metode iterasi lambda, pemodelan aturan *fuzzy* juga dilakukan dengan prioritas pembebanan dari metode *merit loading*

Tabel 11. Prioritas pembebanan *merit loading* pada pembagian beban metode logika *fuzzy*.

Units	P (2496)	P (3850)	P (4392)
STG10	0	0	100,92
GTG11	0	0	94,09
GTG12	0	0	80,219
GTG13	0	0	45,0357
STG20	0	95,14	136,32
GTG21	0	0	97
GTG22	0	95	97
GTG23	0	95	97
RBG1	0	266	271,6
RBG2	0	266	271,6
CLCP1	0	266,95	272,57
CLCP2	0	266,95	272,57
TJATI1	631,064	627,76	640,976
TJATI2	631,064	627,76	640,976
TJATI3	631,351	628,045	641,267
TJATI4	631,351	628,045	641,267
TOTAL	2524,83	3862,65	4400,41

Tabel 12. Biaya bahan bakar dari pembagian beban dengan prioritas pembebanan *merit loading*.

Units	F (2524,83)	F (3862,65)	F (4400,41)
STG10	0	0	0

Units	F (2524,83)	F (3862,65)	F (4400,41)
GTG11	0	0	106.922.497,22
GTG12	0	0	287.976.039,39
GTG13	0	0	49.640.755,96
STG20	0	0	0
GTG21	0	0	110.157.301,07
GTG22	0	121.451.922,97	123.028.621,09
GTG23	0	122.451.460,96	124.054.783,73
RBG1	0	95.510.868,40	97.031.777,85
RBG2	0	95.510.868,40	97.031.777,85
CLCP1	0	106.680.029,46	108.773.456,34
CLCP2	0	106.680.029,46	108.773.456,34
TJATI1	184.372.059,04	183.561.088,12	186.797.992,73
TJATI2	184.372.059,04	183.561.088,12	186.797.992,73
TJATI3	184.049.780,50	183.099.884,87	186.909.147,32
TJATI4	184.049.780,50	183.099.884,87	186.909.147,32
TOTAL	736.843.679,08	1.381.607.125,64	1.960.804.746,92

Tabel 13. Perbandingan prioritas pembebanan *merit loading* dengan iterasi lambda pada logika *fuzzy*

Iterasi Lambda		Merit loading		Selisih
F	P	F	P	
1.116.561.627,02	2513,9	736.843.679,08	2524,8	379.717.947,9
1.514.172.091,3	3849,6	1.381.607.125,64	3862,7	132.564.965,6
1.950.830.914,42	4390,5	1.960.804.746,92	4400,4	-9.973.832,5

Dari Tabel 13, pada beban ± 2496 MW dan ± 3850 MW, prioritas pembebanan metode *merit loading* lebih murah dibandingkan pada prioritas pembebanan metode iterasi lambda. Hal ini dikarenakan terjadi perbedaan penjadwalan unit yang beroperasi, sehingga pemilihan unit-unit yang beroperasi akan mempengaruhi tingkat efisiensi biaya bahan bakar.

Sedangkan dari perbandingan prioritas pembebanan *merit loading* dengan iterasi lambda pada logika *fuzzy* dari beban ± 4392 MW, tidak dapat disimpulkan bahwa prioritas pembebanan metode iterasi lambda lebih murah dibandingkan pada prioritas pembebanan metode *merit loading*, karena unit yang beroperasi antara kedua metode tersebut adalah sama.

5. SIMPULAN

Karakteristik *incremental cost* dari unit pembangkit *thermal* Jateng dan DIY menghasilkan prioritas pembebanan sebagai berikut, yaitu PLTU Rembang, unit GTG 1.3 Tambak Lorok, PLTU Tanjung Jati unit 3 & 4, unit GTG 1.2 Tambak Lorok, PLTU

Cilacap, PLTU Tanjung Jati unit 1 & 2, kemudian unit GTG 2.2, 1.1, 2.1, & 2.3 Tambak Lorok.

Persentase deviasi pembagian beban antara metode iterasi lambda dengan logika *fuzzy* pada beban 2496 MW dan 3850 MW berturut-turut adalah 6,58% dan 4,39%, sedangkan pada beban 4392 MW mencapai 17,23%. Kemudian untuk MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) daya total pembangkitan antara iterasi lambda dan logika *fuzzy* terhadap kebutuhan beban, berturut-turut adalah 0% dan 0,25%.

Jika menitikberatkan pada daya total pembangkitan yang harus sama dengan kebutuhan beban, maka metode iterasi lambda lebih efektif dibandingkan metode logika *fuzzy*, karena pada logika *fuzzy* memiliki nilai *error* terhadap kebutuhan beban. Selain itu, proses menggunakan logika *fuzzy* lebih lama karena harus menentukan variabel *input-output*, fungsi keanggotaan, dan aturan *fuzzy*. Namun pada iterasi lambda, prioritas pembebanan hanya terbatas pada sifat *incremental cost* dari masing-masing unit pembangkit atau generator.

6. REKOMENDASI

Dilakukan percobaan lebih banyak pemodelan pada logika *fuzzy* untuk pembagian beban unit pembangkit tenaga listrik, agar didapatkan daya pembangkitan yang sama dengan kebutuhan beban (*error* kecil).

Proses dalam melakukan iterasi dapat menjadi pertimbangan, karena sangat berpengaruh terhadap pembagian beban atau committed (penjadwalan) dari unit pembangkit. Kondisi tersebut dimaksudkan, ketika banyak dari unit pembangkit yang berada di luar batasan daya dari masing-masing unit pembangkit, pada iterasi pertama.

7. DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Jasser, A. dan M. M. Hijjo. 2012. Fuzzy-Logic-Based Approach to Solve the Unit-Commitment Problem. *International Journal of Engineering Research and Development* 2(1)
- Angdrie, S. V., L. S. Patras, H. Tumaliang, dan F. Lisi. 2012. Optimasi Biaya Bahan Bakar Untuk Penjadwalan Unit-Unit Pada Pembangkit Thermal Sistem Minahasa Dengan Metode Iterasi Lambda. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer* 1(2). Universitas Samratulangi. Manado
- Dike, D. O., M. I. Adinfono, dan G. Ogu. 2013. Economic Dispatch of Generated Power Using Modified Lambda Iteration Method. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)* 7(1). Federal University of Technology. Nigeria.
- Endaryati, B. dan R. Kurniawan. 2015. Komparasi Metode Peramalan Automatic Clustering Technique and Fuzzy Logical Relationships Dengan Single Exponential Smoothing. *Media Statistika* 8(2). Sekolah Tinggi Ilmu Statistika (STIS). Jakarta
- Kaur, M. dan R. K. Dhaliwal. 2012. Fuzzy Logic and Neural Network Approach to Short Term Thermal Unit Commitment. *International Journal of Advanced Engineering Technology* 3(1). India
- Khikmiyah, L., W. Anggraini, dan R. A. Vinarti. 2012. Prediksi Permintaan Gas Cair Menggunakan Fuzzy Inference Model pada PT Air Products Gresik. *Jurnal Teknik Pomits* 1(1). Institut Sepuluh Nopember (ITS). Surabaya
- Kusumadewi, S. dan S. Hartati. 2010. *Neuro-Fuzzy: Integrasi Sistem Fuzzy dan Jaringan Syaraf*. Graha Ilmu. Yogyakarta.
- Marifah, R. N., Y. Mulyadi, dan A. G. Abdullah. 2013. Operasi Ekonomis Pembangkit Thermal Sistem 500 kV Jawa-Bali Dengan Pendekatan Algoritma Fuzzy Logic. *Jurnal Electrans* 12(2). Bandung.
- Marsudi, D. 2011. *Pembangkitan Energi Listrik*. Edisi Kedua. Erlangga. Jakarta.
- Saadat, H. 1999. *Power System Analysis*. McGraw-Hill. Singapore.
- Sofyan, N. Harun, dan Tola. 2010. Studi Operasi Ekonomis Pada Generator Pembangkit Sistem Sulawesi Selatan. *Media Elektrik* 5(1). Universitas Hasanuddin. Makassar.
- Solichan, A. dan M. T. Prasetyo. 2013. Optimasi Jadwal Operasi dan Pemeliharaan Pembangkit Tenaga Listrik Menggunakan Metode Algoritma Genetika. *Media Elektrika* 6(2). ISSN: 1979-7451. Universitas Muhammadiyah. Semarang
- Widodo, P. P. dan R. T. Handayanto. 2012. Penerapan Soft Computing Dengan Matlab. Rekayasa Sains. Bandung.
- Wood, A. J. dan B. F. Wollenberg. 1996. *Power Generation, Operation and Control*. John Wiley & Sons, Inc. United States of America.