

Optimisasi *Unit Commitment* Mempertimbangkan Fungsi Biaya Tidak Mulus Dengan *Firefly Algorithm*

Benny Prastikha Hadhi, Rony Seto Wibowo, Imam Robandi
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: ronyseto@ee.its.ac.id, robandi@ee.its.ac.id

Abstrak—Setiap unit pembangkit yang beroperasi untuk memenuhi permintaan beban mempunyai jadwal operasi yang berbeda-beda. Hal ini disebabkan oleh perbedaan karakteristik input-output yang khas dari setiap unit. Untuk memperoleh biaya pembangkitan yang ekonomis dibutuhkan penjadwalan nyala-padam unit pembangkit yang terhubung pada sistem tenaga listrik, yang dikenal sebagai *unit commitment* (UC). Penjadwalan unit pembangkit pada suatu sistem tenaga listrik memiliki banyak pertimbangan, seperti cadangan berputar (*spinning reserve*), waktu menyala minimal (*minimum up time*), waktu padam minimal (*minimum down time*), rentang daya output unit pembangkit dan lain-lain. Selain itu, fungsi biaya pembangkitan dari unit yang mengoperasikan katup uap untuk mengimbangi perubahan beban menyebabkan persamaan fungsi biaya menjadi tidak mulus. Fungsi biaya tidak mulus mempersulit penjadwalan ekonomis unit pembangkit. Tugas akhir ini mengajukan *Firefly Algorithm* (FA) sebagai metode untuk menyelesaikan penjadwalan UC. FA merupakan algoritma yang sederhana, tetapi handal menyelesaikan permasalahan optimisasi. UC yang diajukan menggunakan fungsi biaya tidak mulus. Dengan metode tersebut, diharapkan permasalahan penjadwalan unit pembangkit dapat terselesaikan dengan baik sehingga memperoleh biaya total pembangkitan yang ekonomis.

Kata Kunci—UC, karakteristik input-output, fungsi biaya tidak mulus, FA.

I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan yang sangat penting bagi kehidupan manusia. Pemakaian energi listrik terus meningkat seiring peningkatan jumlah populasi dan kesejahteraan manusia. Permintaan daya listrik yang terus bertambah menyebabkan daya listrik yang harus disuplai oleh pembangkit menjadi sangat besar sehingga tidak mungkin hanya menggunakan satu unit pembangkit yang beroperasi [1]. Jumlah beban yang harus disuplai unit-unit pembangkit selalu berubah setiap waktu, baik menurun maupun meningkat. Oleh karena itu, jumlah energi listrik terbangkitkan harus seimbang dengan jumlah beban dan *losses* yang ditanggung sistem tenaga listrik untuk memperoleh biaya pembangkitan yang ekonomis, namun tetap menjaga performa sistem [2]. Jenis operasi pada area pembangkitan dapat berupa peningkatan dan penurunan daya output, penyalaan dan pemadaman unit-unit pembangkit untuk mengimbangi beban yang disuplai [3].

Unit commitment adalah penjadwalan nyala-mati unit-unit pembangkit yang beroperasi pada suatu sistem tenaga listrik. Penyalaan dan pemadaman unit pembangkit pada suatu sistem tenaga listrik memiliki banyak pertimbangan, seperti cadangan berputar (*spinning reserve*), waktu minimal untuk menyala (*minimum up time*), waktu minimal untuk padam (*minimum down time*), batas daya keluaran maksimal dan minimal unit pembangkit dan lain-lain [3].

Setiap unit pembangkit memiliki karakteristik input-output yang khas. Karakteristik input-output sangat mempengaruhi fungsi biaya pembangkitan unit pembangkit. Pada unit pembangkit yang mengoperasikan mekanisme buka-tutup katup uap menimbulkan efek *ripple* pada grafik karakteristik input-output sehingga fungsi biaya pembangkitan menjadi fungsi yang tidak mulus atau berorde lebih dari dua [4]. Fungsi biaya yang tidak mulus menambah tingkat kesulitan dalam perhitungan biaya pembangkitan unit pembangkit dan menyulitkan proses penjadwalan *unit commitment*. Pada tugas akhir ini akan diusulkan algoritma kunang-kunang (*firefly algorithm*) untuk menyelesaikan permasalahan *unit commitment* dengan fungsi biaya pembangkitan tidak mulus secara optimal.

II. UNIT COMMITMENT

A. *Unit Commitment* (UC)

Unit commitment merupakan penjadwalan waktu penyalaan dan penghubungan unit pembangkit pada suatu sistem tenaga listrik yang direncanakan dalam waktu yang bervariasi dari beberapa jam hingga satu minggu, dengan tujuan utama untuk memenuhi permintaan beban listrik [5]. Permintaan beban per jam untuk permasalahan UC merupakan hasil peramalan beban yang tepat. Kriteria optimisasi untuk menentukan penjadwalan UC adalah meminimalkan biaya pembangkitan dari unit-unit pembangkit yang beroperasi [3].

Permasalahan pada UC merupakan kombinasi dari dua sub-masalah. Pertama adalah menentukan unit pembangkit yang akan dinyalakan. Kedua adalah menentukan jumlah biaya generasi dari masing-masing unit yang berkomitmen. Kombinasi unit pembangkit yang menghasilkan biaya produksi paling minimal akan dipilih sebagai jadwal UC untuk tiap jam [3].

Fungsi objektif dari *unit commitment* adalah jumlah biaya bahan bakar, termasuk biaya penyalan dan pemadaman dari unit-unit pembangkit yang menyuplai beban pada rentang waktu tertentu [6],

$$F_H = \sum_{h=1}^H \sum_{n=1}^N \left[F_{nh}(p_{nh}) + CSC_{nh} (1 - u_{n(h-1)}) \right] u_{nh} + DC_{nh} (u_{n(h-1)} - 0) \quad (1)$$

Untuk $F_{nh}(p_{nh})$ dirumuskan

$$F_{nh}(p_{nh}) = a_n (p_{nh})^2 + b_n (p_{nh}) + c_n \quad (2)$$

Untuk batasan-batasan lain adalah:
Keseimbangan daya

$$\sum_{n=1}^N p_{nh} = D_h \quad (3)$$

Rentang daya pembangkitan

$$U_{nh} p_{n(max)} \geq p_{nh} \geq U_{nh} p_{n(min)} \quad (4)$$

Waktu nyala minimal

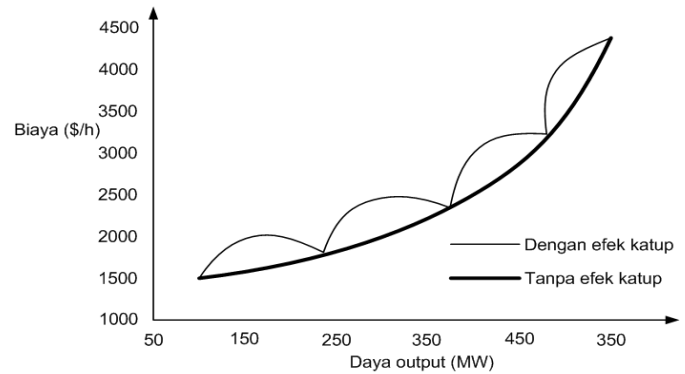
$$T_n^{on} \geq MUT_n \quad (5)$$

Waktu padam minimal

$$T_n^{off} \geq MDT_n + CSH_n \quad (6)$$

Keterangan,

- N = jumlah unit pembangkit yang tersedia
- H = jumlah periode jam penjadwalan
- n = indeks unit (n=1, 2, ..., N)
- h = indeks unit (h=1, 2, ..., H)
- p_{nh} = variabel kontrol untuk unit pembangkit n pada jam h
- U_{nh} = variabel kontrol status nyala/mati unit pembangkit n pada jam h
- F_H = biaya total pembangkitan pada H jam
- $F_{nh}(p_{nh})$ = fungsi biaya bahan bakar unit n pada jam h
- a_n, b_n, c_n = koefisien fungsi biaya unit n
- CSC_{nh} = biaya penyalan temperatur dingin unit n pada jam h
- DC_{nh} = biaya pemadaman unit n pada jam h
- MDT_n = waktu padam minimal unit n
- MUT_n = waktu nyala minimal unit n
- CSH_n = waktu penyalan temperatur dingin unit n
- T_n^{on} / T_n^{off} = rentang waktu selama unit n menyala atau padam
- D_h = permintaan beban puncak pada jam h
- $p_{n(max)}$ = daya output maksimal unit n
- $p_{n(min)}$ = daya output minimal unit n



Gambar 1. Kurva biaya operasi pembangkitan tidak mulus.

B. Fungsi Biaya Tidak Mulus

Operasi pembukaan katup pada turbin uap multi katup menghasilkan efek *ripple* pada kurva *heat-rate* generator. Kurva ini mempunyai persamaan tidak linier yang mempunyai orde tinggi dan membentuk fungsi sinus. Penentuan biaya operasi pembangkitan tiap jam menggunakan fungsi orde dua menjadi tidak akurat ketika terjadi efek *ripple* ini. Untuk mengatasi masalah ini, fungsi sinus perlu ditambahkan pada fungsi biaya kuadratik seperti pada persamaan (7),

$$F_n = a_n (p_n)^2 + b_n (p_n) + c_n + |e_n \sin(f_n (p_{n(min)} - p_n))| \quad (7)$$

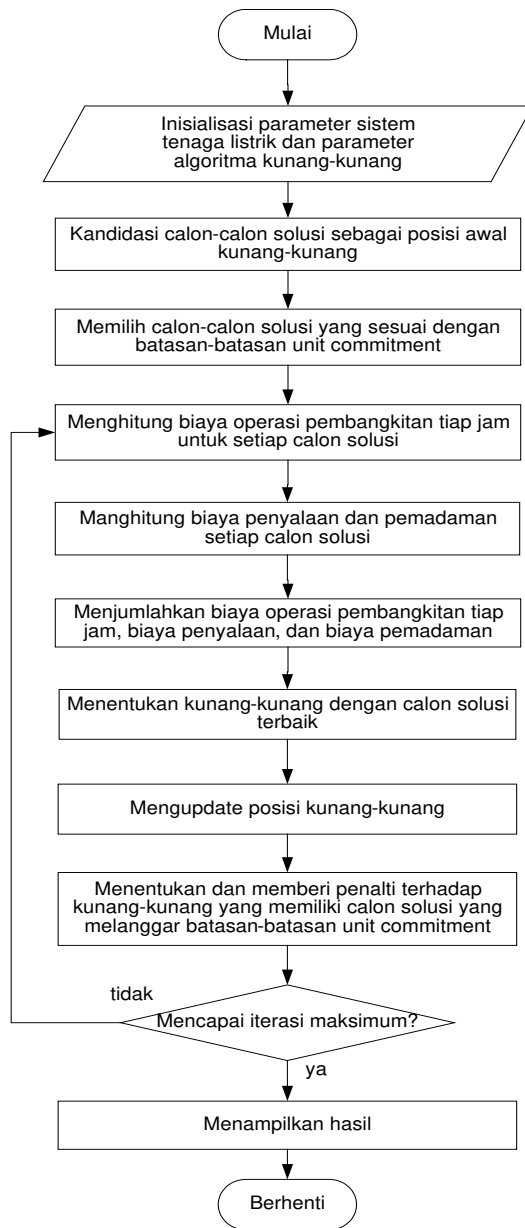
e_n dan f_n adalah koefisien biaya tidak mulus dari unit pembangkit dengan efek katup [7].

III. ALGORITMA KUNANG-KUNANG DAN PENERAPAN PADA UNIT COMMITMENT

Algoritma kunang-kunang atau *firefly algorithm* (FA) adalah algoritma metaheuristik yang terinspirasi dari perilaku kedip cahaya kunang-kunang. Terdapat dua fungsi dasar kedip cahaya tersebut, yaitu untuk menarik perhatian kunang-kunang yang lain (komunikasi) dan untuk menarik mangsa.

FA dikembangkan oleh Xin-She Yang pada 2007, yang menggunakan tiga peraturan sebagai berikut :

- 1) Semua kunang-kunang berjenis kelamin satu sehingga seekor kunang-kunang akan tertarik pada kunang-kunang lain terlepas dari jenis kelamin.
- 2) Daya tarik sebanding dengan tingkat kecerahan cahaya kedip kunang-kunang. Oleh karena itu, untuk setiap dua kunang-kunang berkedip, satu di antara mereka akan bergerak menuju kunang-kunang lain yang lebih terang. Kecerahan mereka menurun karena jarak antara kunang-kunang meningkat. Jika tidak ada yang paling terang dari populasi tersebut, semua kunang-kunang akan bergerak secara acak.
- 3) Kecerahan dari seekor kunang-kunang dipengaruhi atau ditentukan oleh fungsi objektif [8].



Gambar 2. Diagram alir algoritma kunang-kunang yang diterapkan pada unit commitment.

A. Inisialisasi Awal FA

Pada proses inisialisasi, pertama yang akan dilakukan adalah memuat sistem yang akan dioptimisasi. Kemudian posisi awal kunang-kunang yang dibangkitkan secara acak pada bilangan nol dan satu. Penentuan posisi kunang-kunang berisi kandidat-kandidat solusi yang merupakan kombinasi unit yang nyata dan mati. Kemudian setiap kandidat solusi akan dipilih berdasarkan batasan-batasan pada persamaan (3), (5), dan (6). Cadangan berputar, losses, dan penyalaaan pada temperatur kerja diabaikan pada Tugas akhir ini.

B. Penentuan Biaya Pembangkitan Total

Biaya pembangkitan yang diperhitungkan pada tugas akhir ini dibatasi tiga biaya saja, yaitu biaya penyalaaan, biaya operasi, dan biaya pemadaman. Untuk biaya penyalaaan yang digunakan hanya biaya penyalaaan kondisi dingin saja dan

Tabel 1. Parameter-parameter FA

Parameter	Nilai
Jumlah kunang-kunang	30
Jumlah iterasi maksimal	200
α	0,25
β_0	0,15
γ	1

tidak memperhitungkan penyalaaan kondisi temperatur kerja. Pada biaya operasi menggunakan fungsi biaya tidak mulus seperti persamaan (7).

C. Update Posisi Kunang-Kunang

Setelah memperoleh biaya total pembangkitan, maka dilakukan perankingan posisi kunang-kunang berdasarkan hasil fungsi objektif yang merupakan biaya pembangkitan total paling minimal. Kemudian semua kunang-kunang akan digerakkan menuju kunang-kunang yang mempunyai hasil paling minimal dari fungsi objektif. Kunang-kunang yang memiliki hasil fungsi objektif paling minimal pada FA dilambangkan sebagai kunang-kunang yang mempunyai intensitas cahaya paling terang sehingga kunang-kunang lain bergerak mendekat. Untuk mencegah FA terjebak dalam nilai optimal lokal, maka digunakan koefisien penyerapan cahaya γ . Berikut ini adalah persamaan intensitas cahaya $I_{(r)}$ [8].

$$I_{(r)} = I_0 e^{-\gamma r} \tag{8}$$

I_0 adalah intensitas cahaya kunang-kunang yang paling terang. Pada kunang-kunang yang berdekatan maka akan timbul daya tarik menarik yang dilambangkan dengan β yang dirumuskan pada persamaan (9),

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \tag{9}$$

β_0 adalah daya tarik pada $r = 0$, sehingga pergerakan kunang-kunang i yang menarik kunang-kunang lain ditentukan pada persamaan (10),

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \epsilon_i \tag{10}$$

α adalah parameter pengacak dan ϵ_i adalah sebuah vector dari nilai-nilai acak yang diambil dari distribusi Gaussian atau distribusi seragam [8].

IV. HASIL DAN ANALISIS

Tugas akhir ini menggunakan FA yang disimulasikan pada program Matlab. Parameter-parameter FA yang digunakan tertera pada tabel 1.

A. Sistem Tenaga Listrik

Pada tugas akhir ini menggunakan dua sistem uji, yaitu Sistem IEEE 14 bus dan Sistem IEEE 30 bus. Sistem IEEE 14 bus memiliki 5 unit pembangkit termal dan memiliki 20 saluran, sedangkan Sistem IEEE 30 bus terdapat 6 unit pembangkit termal dan memiliki 41 saluran [3]. Fungsi biaya unit pembangkit yang disajikan menggunakan fungsi biaya tidak mulus.

Tabel 2.

Data batasan unit pembangkit sistem IEEE 14 bus

Unit	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Nyala min (jam)	Padam min (jam)
1	150	50	3	3
2	50	20	3	3
3	80	12	2	2
4	45	10	2	2
5	45	10	2	2

Tabel 3.

Data biaya operasi sistem IEEE 14 bus

Unit	Koefisien biaya operasi					Biaya penyalaaan (\$)		Biaya padam (\$)
	a	b	c	e	f	Panas	Dingin	
1	0,00375	2,00	0	18	0,037	70	176	50
2	0,01750	1,75	0	16	0,038	74	187	60
3	0,06250	1,00	0	14	0,400	110	113	30
4	0,00834	3,25	0	12	0,045	50	267	85
5	0,02500	3,00	0	13	0,042	72	180	52

Tabel 4.

Data pembebanan sistem IEEE 14 bus 12 jam

Jam ke	Beban (MW)	Jam ke	Beban (MW)
1	181,30	7	181,30
2	170,94	8	202,03
3	150,22	9	212,38
4	103,60	10	227,92
5	129,50	11	230,51
6	155,40	12	217,56

Tabel 5.

Data batasan unit pembangkit sistem IEEE 30 bus

Unit	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Nyala min (jam)	Padam min (jam)
1	200	50	4	4
2	80	20	3	3
3	50	12	2	3
4	35	10	2	2
5	30	10	2	2
6	40	12	2	2

Tabel 6.

Data biaya operasi sistem IEEE 30 bus

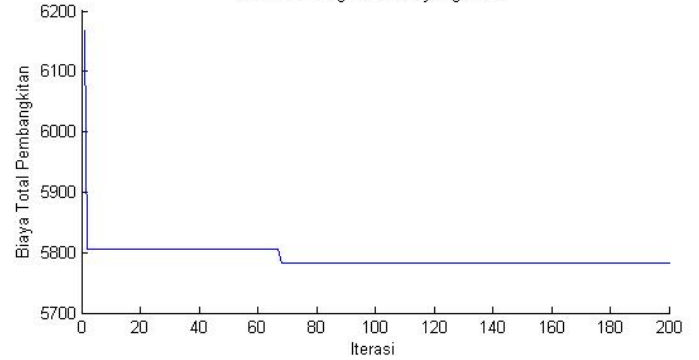
Unit	Koefisien biaya operasi					Biaya penyalaaan (\$)		Biaya padam (\$)
	a	b	c	e	f	Panas	Dingin	
1	0,00375	2,00	0	18	0,037	70	176	50
2	0,01750	1,75	0	16	0,038	74	187	60
3	0,06250	1,00	0	14	0,400	110	113	30
4	0,00834	3,25	0	12	0,045	50	267	85
5	0,02500	3,00	0	13	0,042	72	180	52
6	0,02500	3,00	0	13,25	0,041	40	113	30

Tabel 7.

Data pembebanan sistem IEEE 30 bus 12 jam

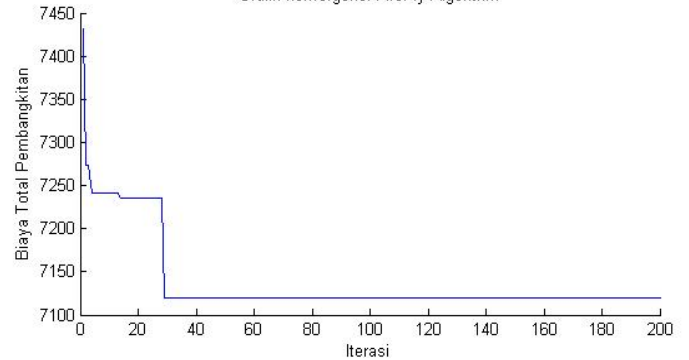
Jam ke	Beban (MW)	Jam ke	Beban (MW)
1	166,00	7	246,00
2	196,00	8	213,00
3	229,00	9	192,00
4	267,00	10	161,00
5	283,40	11	147,00
6	272,00	12	160,00

Grafik konvergensi FireFly Algorithm



Gambar 3. Grafik konvergensi Sistem IEEE 14 bus

Grafik konvergensi FireFly Algorithm



Gambar 4. Grafik konvergensi Sistem IEEE 30 bus

Tabel 8.

Hasil penjadwalan unit pembangkit menggunakan fungsi biaya pembangkitan mulus

Jam ke	Sistem IEEE 14 bus, unit ke					Sistem IEEE 30 bus, unit ke					
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
2	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
3	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
4	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
5	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
6	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
7	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
8	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
9	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
10	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
11	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
12	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0

Untuk mengetahui pengaruh fungsi biaya pembangkitan, maka pada simulasi akan dilakukan dalam empat kasus. Pada kasus pertama semua unit pembangkit dalam kondisi menyala dan menggunakan fungsi biaya mulus. Pada kasus kedua semua unit dalam kondisi menyala dan menggunakan fungsi biaya tidak mulus. Pada kasus ketiga semua unit pembangkit dalam kondisi padam dan menggunakan fungsi biaya mulus. Pada kasus keempat semua unit pembangkit dalam kondisi padam dan menggunakan fungsi biaya tidak mulus.

Tabel 9.
Hasil penjadwalan unit pembangkit menggunakan fungsi biaya pembangkitan tidak mulus

Jam ke	Sistem IEEE 14 bus, unit ke					Sistem IEEE 30 bus, unit ke					
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6
1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0
2	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0
3	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
4	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
5	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
6	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
7	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
8	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
9	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
10	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
11	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
12	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0

Tabel 10.
Biaya total pembangkitan kasus 1

Biaya	Sistem	
	IEEE 14 bus	IEEE 30 bus
Rata-rata	\$ 5243,65347	\$ 6399,361028
Tertinggi	\$ 5243,65347	\$ 6399,361028
Terendah	\$ 5243,65347	\$ 6399,361028
Standar deviasi	0	0

Tabel 11.
Biaya total pembangkitan kasus 2

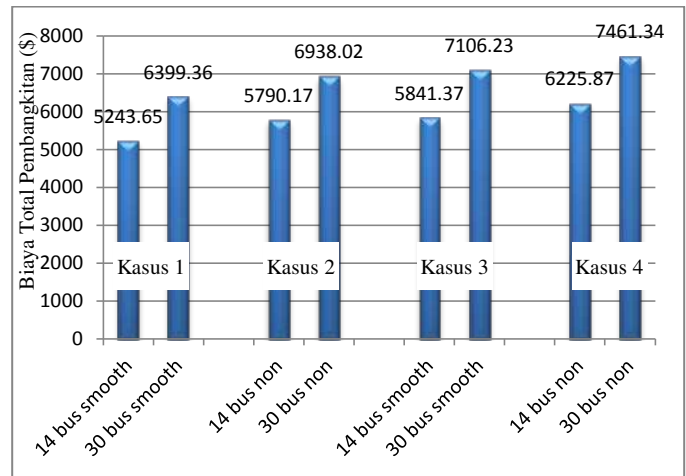
Biaya	Sistem	
	IEEE 14 bus	IEEE 30 bus
Rata-rata	\$ 5790,165704	\$ 6938,021503
Tertinggi	\$ 5793,586044	\$ 6955,559208
Terendah	\$ 5787,580118	\$ 6934,767757
Standar deviasi	\$ 2,248334	\$ 6,783193

Tabel 12.
Biaya total pembangkitan kasus 3

Biaya	Sistem	
	IEEE 14 bus	IEEE 30 bus
Rata-rata	\$ 5841,367803	\$ 7106,229292
Tertinggi	\$ 5931,609016	\$ 7383,364779
Terendah	\$ 5757,198755	\$ 6912,112410
Standar deviasi	\$ 84,824551	\$ 122,155661

Tabel 13.
Biaya total pembangkitan kasus 4

Biaya	Sistem	
	IEEE 14 bus	IEEE 30 bus
Rata-rata	\$ 6225,868246	\$ 7461,345376
Tertinggi	\$ 6482,550104	\$ 7648,290362
Terendah	\$ 6119,386125	\$ 7272,228936
Standar deviasi	\$ 121,269488	\$ 132,954836



Gambar 5. Perbandingan biaya total pembangkitan rata-rata

Pada kasus pertama, hasil simulasi menunjukkan bahwa biaya total pembangkitan memperoleh hasil yang selalu sama pada masing-masing sistem. Oleh karena itu, pada kasus pertama mempunyai standar deviasi bernilai nol, Kasus kedua, hasil simulasi menunjukkan bahwa biaya total pembangkitan mempunyai standar deviasi sebesar 0,04% untuk sistem IEEE 14 bus, dan sebesar 0,1% untuk sistem IEEE 30 bus terhadap biaya total pembangkitan rata-rata. Kasus ketiga, memperoleh standar deviasi sebesar 1,45% untuk sistem IEEE 14 bus, dan sebesar 1,72% untuk sistem IEEE 30 bus terhadap biaya total pembangkitan rata-rata. Kasus keempat, memperoleh standar deviasi sebesar 1,95% untuk sistem IEEE 14 bus, dan sebesar 1,78% untuk sistem IEEE 30 bus terhadap biaya total pembangkitan rata-rata..

Pada kasus pertama dan kedua, yang mempunyai kondisi awal unit-unit pembangkit yang sama tetapi fungsi biaya berbeda, terdapat perbedaan sebesar \$ 546,51 pada biaya total pembangkitan rata-rata sistem IEEE 14 bus dan \$ 538,66 pada sistem IEEE 30 bus. Hal ini menunjukkan bahwa fungsi biaya tidak mulus menyebabkan biaya total pembangkitan menjadi lebih mahal. Hasil yang tidak jauh berbeda diperoleh dari selisih biaya total pembangkitan antara kasus ketiga dan keempat, yang mempunyai kondisi awal unit-unit pembangkit yang sama tetapi fungsi biaya berbeda. Pada kasus keempat biaya total pembangkitan rata-rata sistem IEEE 14 bus lebih mahal \$ 373,674 dan pada sistem IEEE 30 bus lebih mahal \$ 353,959 daripada kasus ketiga.

V. KESIMPULAN

Kondisi awal unit pembangkit berpengaruh pada hasil penjadwalan nyala-padam unit pembangkit. Pada sistem IEEE 14 bus dan sistem IEEE 30 bus, biaya penyalaan dan pemadaman cukup besar sehingga hasil penjadwalan cenderung mempertahankan kondisi awal unit pembangkit hingga jam kedua belas. Fungsi biaya pembangkitan yang tidak mulus berpengaruh pada biaya total pembangkitan. Standar deviasi dari hasil pengujian program memperoleh nilai di bawah 2% terhadap biaya total pembangkitan rata-rata.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Imam Robandi, "*Modern Power System Control*", Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2009.
- [2] Hadi Saadat, "*Power System Analysis 2nd Edition*", McGrawHill. Ch.1, 1999.
- [3] R. Reddy Gaddam, "*Optimal Unit Commitment using Swarm Intelligence for Secure Operation of Solar Energy Integrated Smart Grid*", Thesis of International Institute of Information Technology, India, 2013.
- [4] Weerakorn Ongsakul, Vo Ngoc Dieu, "*Artificial Intelligence in Power System Optimization*", Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2013.
- [5] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, *Power, Generation, Operation, and Control*, John Willey & Sons Inc, America, 1996.
- [6] Han Yu, Kit Po Wong, "*An Advanced Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm for Unit Commitment*", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 26, no. 2, May, 2011.
- [7] Xin-She Yang, S. S. Sadat Hosseini, A. H. Gandomi, "*Firefly Algorithm for Solving non-Convex Economic Dispatch Problems with Valve Loading Effect*", ELSEVIER on Applied Soft Computing 12 (2012) 1180–1186, 2011.
- [8] Xin-She Yang, "*Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms Second Edition*", Luniver Press, United Kingdom, 2010.