

Penerapan Batas *Ramp-Rate* Menggunakan Kombinasi Metode FDP (*Forward Dynamic Programming*) dan QP (*Quadratic Programming*) Pada *Unit Commitment-Economic Dispatch*

Riza Fahmi Andriyanto, Ontoseno Penangsang, Ni Ketut Aryani
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
e-mail: ontosenop@ee.its.ac.id, Ketut.Aryani@ee.its.ac.id

Abstrak—Kebutuhan akan energi listrik terus meningkat seiring dengan perkembangan teknologi. meningkatnya beban listrik ini harus diimbangi dengan penambahan daya yang dibangkitkan. Hal ini sangat berpengaruh pada penjadwalan unit pembangkit yang harus ditentukan dengan baik agar didapatkan pembangkitan yang optimal. Pada Tugas Akhir ini mengambil topik mengenai *unit commitment* dan *economic dispatch* dengan mempertimbangkan nilai dari batasan generator (*ramp-rate*). Metode yang digunakan adalah *complete enumeration* dengan *forward dynamic programming* pada *unit commitment* dan *quadratic programming* pada *economic dispatch*. Metode - metode tersebut diterapkan dalam pemrograman *matlab* sehingga dapat dijadikan suatu program perhitungan *unit commitment* dan *economic dispatch* dengan mempertimbangkan nilai batasan *ramp-rate*.

Kata kunci—*Unit Commitment, Economic Dispatch, Quadratic Programming.*

I. PENDAHULUAN

ENERGI listrik adalah salah satu energi yang sangat dibutuhkan bagi kehidupan manusia. Permintaan energi listrik terus bertambah seiring bertambahnya jumlah penduduk. Permintaan daya listrik yang terus meningkat menyebabkan produksi daya listrik yang terus meningkat. Untuk mengimbangi permintaan ketersediaan energi listrik dibutuhkan kapasitas pembangkit listrik yang mengalami peningkatan terus menerus, sehingga dibutuhkan kombinasi nyala-mati unit pembangkit [1]. Jumlah beban yang harus disuplai unit-unit pembangkit selalu berubah setiap waktu. Oleh karena itu, pada penyaluran daya listrik, jumlah energi listrik terbangkitkan harus bernilai sama dengan jumlah beban yang harus disuplai untuk memperoleh biaya pembangkitan paling ekonomis. Selain itu penjadwalan unit pembangkit harus memperhatikan cadangan berputar. Jenis operasi sistem tenaga listrik area pembangkitan dapat berupa peningkatan dan penurunan daya output, serta penyalan dan pemadaman unit-unit pembangkit untuk mengimbangi jumlah beban yang ditanggung unit-unit pembangkit.

Unit commitment adalah penjadwalan nyala-mati unit-unit pembangkit yang beroperasi pada suatu sistem tenaga listrik.

Penyalan dan pemadaman unit pembangkit pada suatu sistem tenaga listrik memiliki banyak pertimbangan, seperti *ramp-rate*, cadangan berputar (*spinning reserve*), waktu nyala minimal (*minimum up time*), waktu padam minimal (*minimum down time*).

Setiap unit pembangkit memiliki karakteristik input-output yang khas yang sangat mempengaruhi fungsi biaya pembangkitan unit pembangkit. Pada Tugas Akhir ini akan digunakan algoritma *forward dynamic programming* untuk menyelesaikan permasalahan *unit commitment* untuk mendapatkan kondisi yang optimal.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. *Unit Commitment*

Unit commitment (UC) merupakan penjadwalan waktu penyalan dan penghubungan unit pembangkit pada suatu sistem tenaga listrik yang direncanakan dalam waktu yang bervariasi dari beberapa jam hingga beberapa hari, dengan tujuan utama untuk memenuhi permintaan beban. Secara umum, penjadwalan UC ditentukan untuk beberapa hari ke depan. Permintaan beban per jam untuk permasalahan UC merupakan hasil peramalan beban yang tepat. Kriteria optimisasi untuk menentukan penjadwalan UC adalah biaya pembangkitan yang perlu diminimalkan selama periode perencanaan namun tetap memenuhi semua kendala sistem yang timbul dari batas kemampuan fisik unit pembangkit. Sebuah unit pembangkit memiliki berbagai batasan seperti *ramp-rate*, *minimum up-down time*, batas generasi maksimum dan minimum [2].

Pada penjadwalan *unit commitment* terdapat banyak faktor yang perlu diperhitungkan, yaitu:

1. Batasan dan biaya operasi tiap unit pembangkit
2. Batasan *ramp-rate*
3. Batasan dan biaya penyalan dan pemadaman

Secara teoritis, fungsi objektif dari *unit commitment* adalah jumlah seluruh biaya bahan bakar, termasuk biaya penyalan dan pemadaman dari unit-unit pembangkit yang menyuplai beban pada rentang waktu tertentu [2].

$$F_H = \sum_{h=1}^H \sum_{n=1}^N [F_{nh}(P_{nh}) + STC_{nh}(1 - U_{n(h-1)})]U_{nh} + DC_{nh}(U_{n(h-1)} - 0)(1)$$

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

$$F_{nh}(P_{nh}) = a_n(P_{nh})^2 + b_n(P_{nh}) + C_n \quad (2)$$

Untuk STC_{nh} dirumuskan

$$HSC_n \text{ jika } MDT_n \leq T_n^{off} \leq MDT_n + CSH_n \quad (3)$$

$$CSC_n \text{ jika } T_n^{off} > MDT_n + CSH_n \quad (4)$$

Untuk batasan-batasan lain adalah:

Ramp-Rate

$$\begin{aligned} P_n(h-1) - P_n(h) &\leq DR_n \\ P_n(h) - P_n(h-1) &\leq DR_n \end{aligned} \quad (5)$$

Rentang daya pembangkitan

$$U_{nh}P_{n(max)} \geq P_{nh} \geq U_{nh}P_{n(min)} \quad (6)$$

Waktu nyala minimal

$$T_n^{on} \geq MUT_n \quad (7)$$

Waktu padam minimal

$$T_n^{off} \geq MDT_n \quad (8)$$

Cadangan Berputar

$$\sum_{i=1}^N (P_{n(max)} - P_{nh}) \geq R_h \quad (9)$$

Keterangan:

F_H = biaya total pembangkitan pada H jam

N = jumlah unit pembangkit yang tersedia

H = jumlah periode jam penjadwalan

n = indeks unit ($n=1, 2, \dots, N$)

h = indeks jam ($h=1, 2, \dots, H$)

$F_{nh}(P_{nh})$ = fungsi biaya bahan bakar unit n pada jam h

STC_{nh} = biaya penyalan unit n pada jam h

HSC_n = biaya penyalan panas unit n pada jam h

CSC_n = biaya penyalan dingin unit n pada jam h

U_{nh} = variabel kontrol status nyala/mati unit pembangkit n pada jam h

DC_{nh} = biaya pemadaman unit n pada jam h

a_n, b_n, C_n = koefisien fungsi biaya unit n

P_{nh} = daya terbangkit unit pembangkit n pada jam h

$P_{nh(max)}$ = daya output maksimal untuk unit pembangkit n pada jam h

DR_n = Batas bawah *ramp-rate*

UR_n = Batas atas *ramp-rate*

R_h = cadangan berputar pada jam h

T_{on}/T_{off} = rentang waktu selama unit n menyala atau padam

MUT_n = waktu nyala minimal unit n

MDT_n = waktu padam minimal unit n

$P_{n(max)}/P_{n(min)}$ = daya output maksimal/minimal unit n

seperti besarnya daya yang dapat dibangkitkan pembangkit dan *incremental cost* telah didapat. Besarnya daya setiap generator dimasukkan sebagai input pada *economic dispatch* bersama karakteristik *input-output*, kemudian *quadratic programming* sebagai metode akan mengolah daya dan karakteristik menjadi bentuk biaya.

Quadratic programming memiliki dimensi penyelesaian masalah sebanyak jumlah pembangkit yang ada, tidak melihat apakah pembangkit tersebut dalam keadaan mati atau hidup. Ini mengakibatkan *quadratic programming* dapat mengambil suatu keputusan yang tidak *feasible* untuk dijalankan.

Quadratic programming akan mencari pembangkitan dengan total biaya paling optimal yang memenuhi permintaan daya listrik.

B. Forward Dynamic Programming untuk penyelesaian Unit commitment

Algoritma *dynamic programming* dapat dibuat bekerja secara mundur. Memulai analisa dari jam terakhir lalu kembali ke jam awal. Ini dilakukan untuk mempelajari dan menganalisa ulang jalur yang telah diambil untuk menuju jam terakhir dari jam awal. Sebaliknya, algoritma *dynamic programming* dapat dibuat bekerja maju, memulai dari jam awal ke jam terakhir. Pendekatan *forward dynamic programming* memiliki kelebihan dalam penyelesaian *unit commitment*. Keuntungan penggunaan *forward dynamic programming* yaitu kondisi awal dapat dengan mudah ditentukan pada perhitungan dapat terus berlanjut selama diperlukan [3].

Fungsi dari *forward dynamic programming* untuk menghitung biaya minimum dalam jam K dengan kombinasi I adalah:

$$F_{cost}(K, I) = \min[P_{cost}(K, I) + S_{cost}(K-1, L, K, I)\{L\} + F_{cost}(K-1, L)] \quad (10)$$

State (K, I) merupakan kombinasi ke $-I$ pada jam ke K . Metode yang dipakai dalam penentuan kombinasi adalah *complete enumeration*, dimana semua kombinasi pembangkit diperhitungkan sebanyak $2^n - 1$.

Pada *forward dynamic programming* yang dimaksud *strategy* adalah transisi, atau *path* (jalur), dari satu *state* pada jam tertentu pada *state* selanjutnya pada jam selanjutnya.

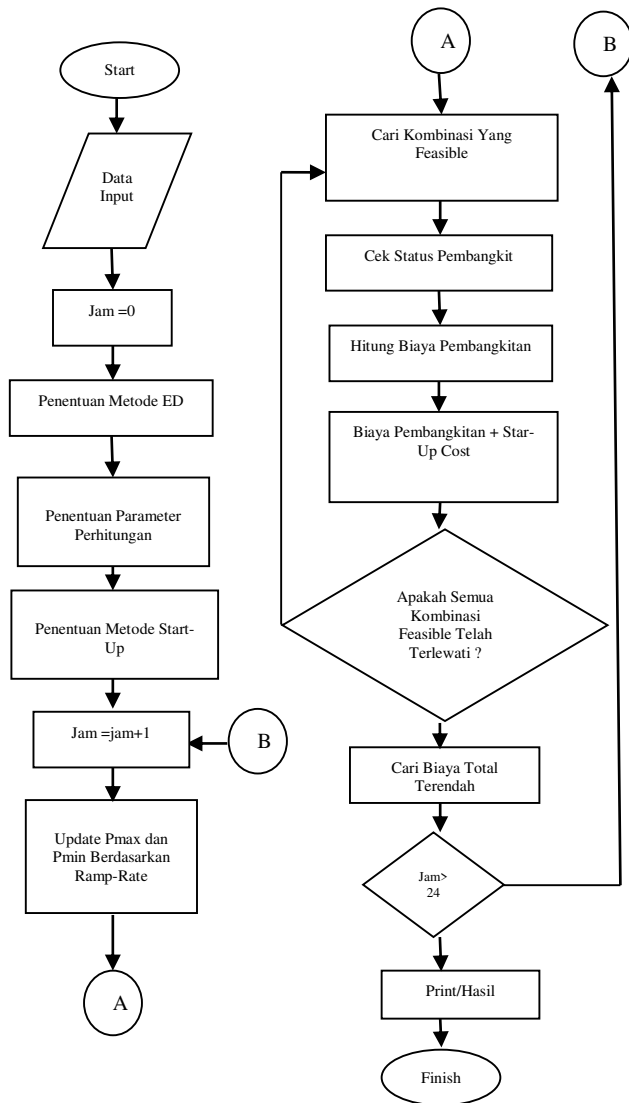
C. Proses Kerja Program

Secara keseluruhan, program ini memiliki *flowchart* proses sebagai berikut:

III. METODE PENELITIAN

A. Economic Dispatch dengan Quadratic Programming

Economic Dispatch adalah suatu metode perhitungan biaya produksi tiap jamnya. Pada tugas akhir ini, karakteristik input-output dari pembangkit yang dipakai *non-linier* dengan orde dua. Dengan fungsi kuadrat pada karakteristik *input-output* yang ada. *Quadratic programming* bekerja setelah data-data



Gambar 1 Flowchart alur program

Dari alur program pada Gambar 1, dimana akan didapatkan nilai pembebanan pembangkit yang optimal dengan biaya pembangkitan termurah.

IV. HASIL DAN ANALISIS

Pada Tugas Akhir ini terdapat 3 kasus yaitu:

A. Studi Kasus 1

Data-data pembangkit yang dipakai pada simulasi studi kasus 1, ditunjukkan pada tabel 1:

Tabel 1.
Data batasan unit pembangkit studi kasus 1

Unit	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Nyala min (jam)	Padam min (jam)	UR	DR	Int
1	455	150	8	8	100	120	8
2	455	150	8	8	100	120	8
3	130	20	5	5	130	130	-5
4	130	20	5	5	130	130	-5
5	162	25	6	6	162	162	-6
6	80	20	3	3	80	80	-3
7	85	25	3	3	85	85	-3

8	55	10	1	1	55	55	-1
9	55	10	1	1	55	55	-1
10	55	10	1	1	55	55	-1

Tabel 2.
Data biaya operasi sistem studi kasus 1

Unit	Koefisien biaya operasi			Biaya penyalaaan (\$)		Biaya padam (\$)
	a	b	c	Panas	Dingin	
1	0,00048	16,19	1000	4500	9000	0
2	0,00031	17,26	970	5000	10000	0
3	0,002	16,6	700	550	1100	0
4	0,00211	16,5	680	560	1120	0
5	0,00398	19,7	450	900	1800	0
6	0,00712	22,26	370	170	340	0
7	0,0079	27,74	480	260	520	0
8	0,00413	25,92	660	30	60	0
9	0,00222	27,27	665	30	60	0
10	0,00173	27,29	670	30	60	0

Tabel 3.
Data pembebanan sistem pada studi kasus 1 dengan interval 24 jam

Jam ke	Beban (MW)	Jam ke	Beban (MW)
1	700	13	1400
2	750	14	1300
3	850	15	1200
4	950	16	1050
5	1000	17	1000
6	1100	18	1100
7	1150	19	1200
8	1200	20	1250
9	1300	21	1300
10	1400	22	1100
11	1450	23	900
12	1500	24	800

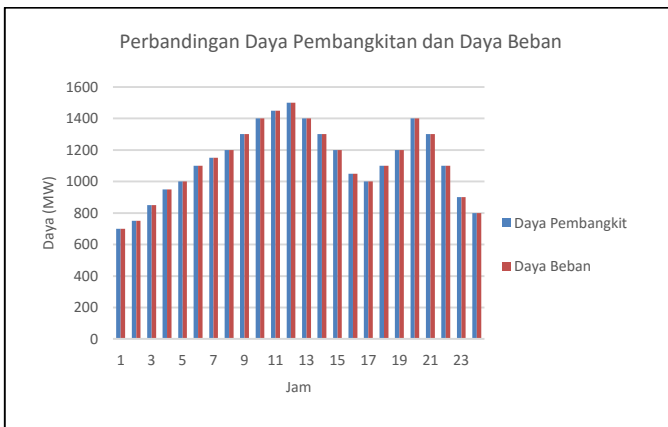
Dari hasil simulasi program, didapatkan hasil biaya pembangkitan dan pembebanan pembangkit selama 24 jam.

Tabel 4.
Pembebanan pembangkit pada sistem studi kasus 1

Jam Ke	Unit									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	455	245	0	0	0	0	0	0	0	0
2	455	295	0	0	0	0	0	0	0	0
3	455	395	0	0	0	0	0	0	0	0
4	455	455	0	0	40	0	0	0	0	0
5	455	455	0	0	90	0	0	0	0	0
6	455	455	0	130	60	0	0	0	0	0
7	455	455	0	130	110	0	0	0	0	0
8	455	455	0	130	160	0	0	0	0	0
9	455	455	130	130	130	0	0	0	0	0
10	455	455	130	130	162	68	0	0	0	0
11	455	455	130	130	162	80	0	38	0	0
12	455	455	130	130	162	80	0	55	33	0
13	455	455	130	130	162	68	0	0	0	0
14	455	455	130	130	130	0	0	0	0	0
15	455	455	0	130	160	0	0	0	0	0
16	455	440	0	130	25	0	0	0	0	0
17	455	390	0	130	25	0	0	0	0	0

18	455	455	0	130	60	0	0	0	0	0
19	455	455	0	130	160	0	0	0	0	0
20	455	455	130	130	162	68	0	0	0	0
21	455	455	130	130	110	20	0	0	0	0
22	455	455	130	0	0	60	0	0	0	0
23	455	335	110	0	0	0	0	0	0	0
24	455	215	130	0	0	0	0	0	0	0

Pada Tabel 4 menunjukkan hasil simulasi dengan menggunakan nilai batasan ramp-rate. Dapat dilihat semua daya pembangkitan untuk setiap unit tidak ada yang melanggar batasan *ramp-rate*.



Gambar 2. Perbandingan daya pembangkitan dengan daya beban studi kasus 1

Total biaya pembebanan pada studi kasus 1 sebesar 546520.9 \$

B. Studi Kasus 2

Data-data pembangkit yang dipakai pada simulasi studi kasus 2, ditunjukkan pada tabel 5:

Unit	Pmax (MW)	Pmin (MW)	UR	DR
1	73	12	10	10
2	93	26	15	15
3	143	42	23	23
4	70	18	10	10
5	93	30	13	13
6	350	100	50	50
7	248	100	48	48
8	190	40	20	20
9	190	70	30	30
10	113	40	20	20

Tabel 6.
Data biaya operasi sistem studi kasus 2

Unit	Koefisien biaya operasi		
	a	b	c
1	0,0051	2,2034	15
2	0,0040	1,9101	25
3	0,0039	1,8518	40
4	0,0038	1,6966	32
5	0,0021	1,8015	29

6	0,0026	1,5354	72
7	0,0029	1,2643	49
8	0,0015	1,2130	82
9	0,0013	1,1954	105
10	0,0014	1,1285	100

Tabel 7.
Data pembebanan sistem studi kasus 2 selama 24 jam

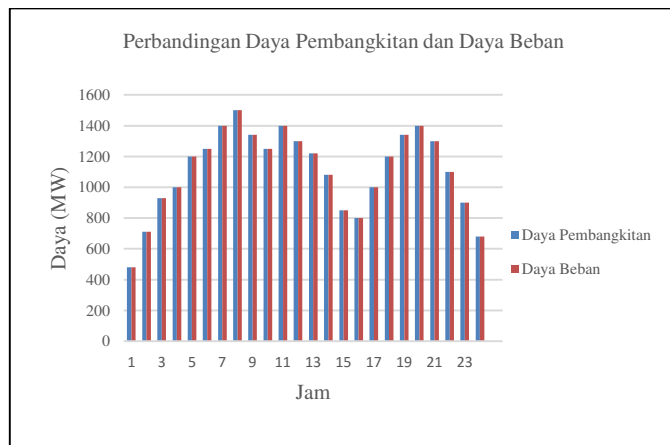
Jam ke	Beban (MW)	Jam ke	Beban (MW)
1	480	13	1220
2	710	14	1080
3	930	15	850
4	1000	16	800
5	1200	17	1000
6	1250	18	1200
7	1400	19	1340
8	1500	20	1400
9	1340	21	1300
10	1250	22	1100
11	1400	23	900
12	1300	24	680

Dari hasil simulasi program, didapatkan hasil biaya pembangkitan dan pembebanan pembangkit selama 24 jam.

Tabel 8.
Pembebanan pembangkit pada sistem studi kasus 2

Jam Ke	Unit									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	55	0	0	0	0	235	0	190	0	0
2	65	0	0	0	0	285	100	190	70	0
3	73	26	42	18	30	303	148	190	100	0
4	63	41	64	28	43	253	188	190	130	0
5	70	56	87	38	56	267	236	190	160	40
6	66	71	110	48	69	258	248	190	190	0
7	73	86	133	58	82	300	248	190	190	40
8	73	93	143	68	93	342	248	190	190	60
9	63	0	120	70	93	292	242	190	190	80
10	53	26	97	65	93	242	194	190	190	100
11	63	41	120	70	93	278	242	190	190	113
12	0	56	112	70	93	228	248	190	190	113
13	0	71	0	70	93	245	248	190	190	113
14	0	0	0	70	93	199	225	190	190	113
15	0	0	42	0	93	222	0	190	190	113
16	0	26	65	0	93	236	0	190	190	0
17	12	41	88	0	93	286	100	190	190	0
18	22	56	111	18	93	332	148	190	190	40
19	32	71	134	28	93	346	196	190	190	60
20	42	86	141	38	93	296	244	190	190	80
21	0	86	118	48	93	246	229	190	190	100
22	0	71	0	58	93	196	189	190	190	113
23	0	0	0	0	93	146	168	190	190	113
24	0	0	0	0	0	0	187	190	190	113

Tabel 8 menunjukkan hasil simulasi dengan menggunakan nilai batasan *ramp-rate*. Dapat dilihat semua daya pembangkitan untuk setiap unit tidak ada yang melanggar batasan *ramp-rate*.



Gambar 3. Perbandingan daya pembangkitan dengan daya beban studi kasus 2

Total biaya pembebanan pada studi kasus 2 sebesar 60771.37 \$.

C. Studi Kasus 3

Data-data pembangkit yang dipakai pada simulasi studi kasus 3, ditunjukkan pada tabel 9:

Tabel 9.
Data batasan unit pembangkit studi kasus 3

Unit	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Nyala min (jam)	Padam min (jam)	UR	DR	Int
1	455	150	8	8	100	120	8
2	455	150	8	8	100	120	8
3	130	20	5	5	130	130	-5
4	130	20	5	5	130	130	-5
5	162	25	6	6	162	162	-6
6	80	20	3	3	80	80	-3
7	85	25	3	3	85	85	-3
8	55	10	1	1	55	55	-1
9	55	10	1	1	55	55	-1
10	55	10	1	1	55	55	-1

Nilai dari cadangan berputar diambil 10 % dari beban yang ditanggung setiap jamnya.

Tabel 10.
Data biaya operasi sistem studi kasus 3

Unit	Koefisien biaya operasi			Biaya penyalan (\$)		Biaya padam (\$)
	A	b	c	Panas	Dingin	
1	0,00048	16,19	1000	4500	9000	0
2	0,00031	17,26	970	5000	10000	0
3	0,002	16,6	700	550	1100	0
4	0,00211	16,5	680	560	1120	0
5	0,00398	19,7	450	900	1800	0
6	0,00712	22,26	370	170	340	0
7	0,0079	27,74	480	260	520	0
8	0,00413	25,92	660	30	60	0
9	0,00222	27,27	665	30	60	0
10	0,00173	27,29	670	30	60	0

Tabel 11.
Data pembebanan sistem IEEE 39 bus 24 jam

Jam ke	Beban (MW)	Jam ke	Beban (MW)
1	700	13	1400

2	750	14	1300
3	850	15	1200
4	950	16	1050
5	1000	17	1000
6	1100	18	1100
7	1150	19	1200
8	1200	20	1250
9	1300	21	1300
10	1400	22	1100
11	1450	23	900
12	1500	24	800

Dari hasil simulasi program, didapatkan hasil biaya pembangkitan dan pembebanan pembangkit selama 24 jam.

Tabel 12.
Pembebanan pembangkit pada sistem studi kasus 3

Jam Ke	Unit									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	455	245	0	0	0	0	0	0	0	0
2	455	295	0	0	0	0	0	0	0	0
3	455	370	0	0	25	0	0	0	0	0
4	455	455	0	0	40	0	0	0	0	0
5	455	390	0	130	25	0	0	0	0	0
6	455	360	130	130	25	0	0	0	0	0
7	455	410	130	130	25	0	0	0	0	0
8	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0
9	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0
10	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0
11	455	455	130	130	162	73	25	10	10	0
12	455	455	130	130	162	80	25	43	10	10
13	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0
14	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0
15	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0
16	455	335	108	127	25	0	0	0	0	0
17	455	260	130	130	25	0	0	0	0	0
18	455	360	130	130	25	0	0	0	0	0
19	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0
20	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0
21	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0
22	455	455	0	0	145	20	25	0	0	0
23	455	425	0	0	0	20	0	0	0	0
24	455	345	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 12 menunjukkan hasil simulasi dengan menggunakan nilai batasan *ramp-rate* dan batasan cadangan berputar. Dapat dilihat semua daya pembangkitan untuk setiap unit tidak ada yang melanggar batasan *ramp-rate* dan batasan *spinning reserve*. Total biaya pembebanan sebesar 559857 \$.

V. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dan analisis dapat diambil beberapa kesimpulan:

1. Pengaruh dari batasan *ramp-rate* pada daya pembangkitan yang sangat ketat, sehingga mencegah generator untuk

bekerja secara maksimal dan memperpanjang *live time* dari unit.

2. Total biaya pembangkitan dengan mempertimbangkan nilai batasan *ramp-rate* lebih besar daripada tanpa batasan *ramp-rate* dikarenakan batasan *ramp-rate* akan menyebabkan variasi daya pembangkitan yang lebih ketat.
3. Metode *quadratic programming* dapat digunakan untuk melakukan perhitungan *economic dispatch* dengan menambahkan batasan *ramp-rate* dan *spinning reserve*.
4. Total biaya pembangkitan dengan mempertimbangkan cadangan berputar dengan batasan *ramp-rate* lebih mahal dibanding tanpa mempertimbangkan cadangan berputar dengan batasan *ramp-rate*, dikarenakan biaya tidak hanya dari daya pembangkitan saja tetapi juga diperhitungkan biaya pelepasan beban pada jam-jam yang melanggar batas *spinning reserve*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Saadat, Hadi, "Power System Analysis 2nd Edition", McGrawHill, Ch.1, 1999.
- [2] Andrianto, Ryco, "*Unit Commitment* Pada Sistem IEEE 30 Bus Dengan 6 Pembangkit Termal Menggunakan Metode *Binery Particle Swarm Optimazion* ", Skripsi Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS, Surabaya, 2013
- [3] C. Gana, "*Unit Commitment* Dengan Forward Dynamic Programming Mempertimbangkan Ramp-Rate dan Karakteristik Input-Output Non-Linier Pada Setiap Pembangkit di Microgrid ", Skripsi Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS, Surabaya, 2012.