Koordinasi Pembangkit Hidro-Termal Berbasis Dynamic Optimal Power Flow Menggunakan Quadratic Programming

Rasyid Wahyu Wijaya, Rony Seto Wibowo, Soedibyo Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia *e-mail*: rasyidww@gmail.com, ronyseto@ee.its.ac.id, soedibyo@ee.its.ac.id

Abstrak—Untuk memenuhi kebutuhan listrik yang terus meningkat, pembangkitan tenaga listrik direncanakan sesuai dengan kebutuhan tersebut. Sebagian besar bahan bakar yang digunakan pada pembangkit listrik di Indonesia adalah batubara, minyak dan gas. Semakin menurunnya jumlah energi fosil, mendorong pemerintah untuk meningkatkan pemanfaatan energi baru dan terbarukan sebagai sumber energi pada pembangkit energi listrik. Pembangkit listrik hidro-termal merupakan salah satu alternatif dalam upaya penghematan bahan bakar yang tidak bisa diperbarui. Dengan mengkoordinasikan antara pembangkit hidro dan pembangkit termal diharapkan dapat mensuplay beban yang dinamis dengan memaksimalkan energi air dari pembangkit hidro dan meminimalkan bahan bakar pembangkit termal. Digunakan analisa aliran daya optimal dinamis (Dynamic Optimal Power Flow) arus searah sebagai dasar pembuatan program. Program akan menentukan pembebanan unit hidro-termal yang tersambung sehingga didapatkan biaya pembangkitan yang ekonomis tiap waktu dengan memperhatikan ramp rate unit pembangkit dan aliran daya pada sistem transmisi. Selain itu dengan menggunakan quadratic programming, program akan membatasi sistem terhadap batasan (equality constraint) dan batasan pertidaksamaan (inequality constraint). Simulasi dilakukan berbasis pada sistem IEEE 30 bus dengan menginisialkan pembangkit ke-6 sebagai unit hidro. Hasil dari simulasi dan analisa menujukkan bahwa program mampu memenuhi semua batasan dan memaksimalkan penggunaan debit air dalam pembebanan selama 24 jam. Dengan penambahan unit hidro, biaya pembangkitan dapat ditekan.

Kata Kunci—Dynamic Optimal Power Flow arus searah, Koordinasi pembangkit Hidro-Termal, Quadratic Programming, Biaya.

I. PENDAHULUAN

Cebagai alternatif untuk menekan tingginya Dpenggunaan bahan bakar fosil, maka pemerintah perlu mengembangkan sumber energi baru dan terbarukan. Salah satu teknik pemanfaatan energi baru dan terbarukan sebagai sumber energi pembangkitan dengan mengkoordinasikan tenaga listrik ialah pembangkit listrik termal dan pembangkit listrik hidro. Pembangkit listrik hidro-termal adalah koordinasi pembangkit dengan mengatur pembebanan. Dimana pengoperasian unit hidro dilakukan semaksimal mungkin mengingat biaya pembangkitan unit hidro yang sangat murah.

Penyediaan listrik harus memenuhi beban yang bersifat continue dan dinamis. Hal ini memerlukan

manajemen operasi yang tertib agar didapatkan suatu pembebanan dan penyaluran yang optimal dan ekonomis. Digunakan analisa aliran daya optimal dinamis (Dynamic Optimal Power Flow) untuk melakukan pembagian pembebanan unit hidro-termal yang tersambung dengan sistem. Sehingga didapatkan biaya pembangkitan yang ekonomis dengan memperhatikan batasan ramp rate unit pembangkit dan kapasitas saluran pada sistem transmisi [3]. DOPF merupakan perhitungan yang melibatkan studi aliran daya (load flow). Studi aliran daya meliputi sudut fasa tegangan masing masing bus lalu perhitungan magnitude dan aliran daya aktif maupun daya reaktif pada saluran [4]. Untuk studi aliran daya terbagi menjadi dua yaitu studi aliran daya arus searah dan studi aliran daya aris bolak balik. Dalam hal ini melakukan perhitungan aliran daya searah lebih cepat dibanding dengan perhitungan arus bolak balik [5][6].

Pada tugas akhir ini digunakan algoritma *quadratic programming* untuk menyelesaikan permasalahan pembagian pembebanan dalam koordinasi pembangkit hidro-termal yang berbasis *DOPF*.

II. KOORDINASI PEMBANGKIT HIDRO-TERMAL BERBASIS Dynamic Optimal Power Flow Arus Searah

A. Dynnamic Optimal Power flow

Pada kondisi real, beban sistem berubah ubah secara dinamis selama 24 jam. Pada penelitian ini diasumsikan beban berubah dengan selang waktu 1 jam. Dengan beban yang dinamis, penyelesaian *OPF* disebut juga dengan *Dynamic Optimal Power Flow (DOPF)*.

Untuk menyelesaikan permasalahan *DOPF*, perlu diperhatikan pula mengenai *ramp rate* pembangkit dan batasan lainnya. *Ramp rate* merupakan batasan kenaikan atau penurunan nilai pembangkitan pada generator. Hal ini untuk menjaga gradien temperatur dan tekanan generator dalam batasan aman sehingga mencegah kerusakan dan menjaga masa hidup generator [9].

B. Ramp rate

Ramp-rate merupakan kemampuan generator untuk melakukan peningkatan (*up-rate*) atau penurunan (*down-rate*) generasi. Setiap unit pembangkit memiliki karakteristik yang berbeda, sehingga membutuhkan fungsi tertentu untuk mendapatkan hasil yang optimal. Fungsi *ramp-rate* dapat dilihat dalam persamaan:

	0	1	1	1		
URi	+ Pi(i	(t - 1) =	Pi max		((1)
Pi(t	-1) -	-DRi =	Pi min		(2)

C. Quadratic Programming

Salah satu metode perhitungan optimasi yaitu quadratic programming. Quadratic programming menyelesaikan permasalahan optimasi dengan fungsi objektif berupa persamaan kuadrat dan batasan batasan linear. Batasan linear dapat berupa persamaan atau equality constraints atau berupa inequality constraints [11]. Persamaan umum quadratic programming dapat dituliskan sebagai berikut:

Fungsi objektif :

$$F(x) = f + g^{T}x + \frac{1}{2}x^{T}Hx$$
 (3)

Inequality constraint: $lb \leq Ax \leq ub$ (4)

$$x_{min} \le x \le x_{max} \tag{5}$$

Equality constraints:

$$lb = ub = b_{eq} \tag{6}$$

$$Ax = b_{eq} \tag{7}$$

Hasil perhitungan quadratic programming yaitu menentukan nilai x yang menghasilkan fungsi objektif dengan nilai minimum.

D. Koordinasi Pembangkit Hidro-Termal

Dengan berbasis pada DOPF arus searah maka akan didapatkan pembebanan pada unit termal dan hidro dalam interval waktu 24 jam. Pada unit hidro dimaksimalkan dengan membangkitkan daya sejumlah dengan debit air yang ada. Sehingga pembebanan pada termal akan ditekan. Dengan persamaan unit pembangkitan hidro sebagai berikut:

$$\sum_{i=1}^{N} Ph_i = Q \tag{8}$$

III. KOORDINASI PEMBANGKIT HIDRO-TERMAL BERBASIS DOPF MENGGUNAKAN QUADRATIC PROGRAMMING

- A. Pada tugas akhir ini dilakukan penyusunan program dengan beberapa tahapan sebagai berikut :
- 1. Tahap pertama yaitu menerapkan metode perhitungan quadratic programming pada DOPF arus searah. Dilakukan Validasi dengan memeriksa total daya pembangkitan generator dan total daya beban. Program bekerja benar jika total daya yang dibangkitkan oleh seluruh unit generator adalah sama dengan total daya beban.
- 2. Tahap kedua yaitu DOPF arus searah dengan mempertimbangkan batasan kapasitas saluran. Dilakukan validasi dengan memeriksa daya pada saluran. Program bekerja benar jika daya yang mengalir pada saluran tidak melampaui batas kapasitas saluran
- 3. Tahap ketiga yaitu DOPF arus searah dengan mempertimbangkan batasan ramp rate pembangkit. Dilakukan validasi dengan memeriksa kenaikan maupun penurunan daya pembangkitan. Program bekerja benar jika kenaikan dan penurunan daya pembangkitan tidak melampaui batasan ramp rate setiap satu jam pada seluruh unit.
- 4. Tahap terakhir yaitu menambahkan fungsi objektif pembangkitan hidro sebagai batasan unit hidro. Dilakukan validasi dengan memeriksa total daya terbangkit pada unit hidro. Program bekerja benar apabila total daya yang dibangkitkan unit hidro adalah sama dengan dilakukan dengan volume atau debit air.

B. Penerapan Quadratic Programming pada DOPF arus searah

Penerapan *quadratic programming* dilakukan dengan inisialisasi permasalahan DOPF arus searah. Inisialisasi terdiri dari dua komponen utama yaitu fungsi objektif (sebagai fungsi yang diminimalkan dalam permasalahan) dan constraints. Fungsi objektif :

$$\begin{array}{l}
\text{Minimize} \quad \sum_{t=1}^{tmax} \left(n_t \sum_{i=1}^{N} F_i^t \right) + \sum_{t=1}^{tmax} n_t F_T^t \quad (9) \\
F_i(P_{Gi}) = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \quad (10)
\end{array}$$

$$a_i(P_{Gi}) = a_i P_{Gi} + b_i P_{Gi} + c_i$$

Keterangan

: Waktu operasi t Ν

: Jumlah pembangkit

(11)

 $F_i(P_{Gi})$: Fungsi biaya generator

Constraint :

Batasan sistem :

 P_{Gi}

- Equality Constraints Active Power Balance

 $P_{t}^{t} + P_{t}^{t} = 0$ pt

$$\sum_{i}^{L} - P_{Gi}^{*} + P_{INi}^{*} = 0 \tag{11}$$

$$P_{IN}^{t} = \sum \frac{1}{x_{ij}} \left[\delta_{i} - \delta_{j} \right]$$
(12)

Keterangan

$$P_{IN}$$
: Daya yang mengalir pada saluran dari bus *i* ke
bus *j*, δ : Sudut tegangan

: Reaktansi saluran x

$$-o_i \le P_{Gi}^* - P_{Gi}^* \le o_i$$
 (14)
Kapasitas Saluran Transmisi

$$\left|P_{ij}^{t}\right| \le P_{ij} \tag{15}$$

$$P_{Gi\ min} \le P_{Gi} \le P_{Gi\ max} \tag{16}$$

C. DOPF arus searah menggunakan Quadratic Programming pada Koordinasi Hidro-Termal

Berdasarkan inisialisasi DOPF arus searah serta persamaan pada quadratic programming, maka DOPF arus searah pada koordinasi pembangkit hidro-termal dapat diselesaikan dengan pemodelan dalam matriks dalam contoh 3 bus 2 pembangkit dengan pembangkit ke 2 merupakan pembangkit hidro sebagai berikut: bue 1 hus 3

Gambar 1. Contoh Sistem Kelistrikan Sederhana

1) Pemodelan Matriks A

* Aeq

Persamaan active power balance sebagai Aeq dapat dituliskan:

$$0 - P_{G_1}^1 + (y_{11}\theta_1 - y_{13}\theta_3)^1 = 0$$

$$0 - P_{G_2}^1 + (y_{22}\theta_2 - y_{23}\theta_3)^1 = 0$$

$$0 - (-y_{13}\theta_1 - y_{23}\theta_2 + y_{33}\theta_3)^1 = 0$$

Matriks A_{eq} dapat dituliskan sebagai berikut:
(17)

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} y_{11} & 0 & -y_{13} & -1 & 0\\ 0 & y_{22} & -y_{23} & 0 & -1\\ -y_{13} & -y_{23} & y_{33} & 0 & 0\\ & nb & & ng \end{bmatrix}$$

Hidro *constraint*

$$\sum_{i=1}^{N} Ph_{Gi} = Q$$
(18)

untuk unit hidro per satu jam dijabarkan menjadi persamaan sebagai berikut:

 $15(P_H) + 300 = Q$

 $15P_{H} = Q - 300$ (19)

Sehingga, untuk sistem selama dua jam dapat dituliskan pada matriks:

 $hidro = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 15] jam k

Dalam hal ini pembangkit ke-2 adalah unit hidro. Secara berurutan nb dan ng merupakan jumlah saluran dan jumlah pembangkit.

* Ainea

Inequality constraint batasan saluran dapat dijabarkan menjadi persamaan from bus to branch dan to bus from branch.

- from bus to branch i

$$P_{to \ branch \ 1} = y_{13}\theta_1 - y_{13}\theta_3 \tag{20}$$

$$P_{to \ branch \ 2} = y_{23}\theta_2 - y_{23}\theta_3 \tag{21}$$

$$P_{from \, branch \, 1} = y_{13}\theta_3 - y_{13}\theta_1 \tag{22}$$

$$P_{from \, branch \, 2} = y_{23}\theta_3 - y_{23}\theta_2 \tag{23}$$

Matriks Aineg branch dituliskan sebagai:

$$A_{ineq\ branch} = \begin{bmatrix} y_{13} & 0 & -y_{13} & 0 & 0\\ 0 & y_{23} & -y_{23} & 0 & 0\\ -y_{13} & 0 & y_{13} & 0 & 0\\ 0 & -y_{23} & y_{23} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Inequality constraint ramp rate diabarkan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$-\delta_1 \le P_{G1}^2 - P_{G1}^1 \le \delta_1$$
(24)
$$-\delta_2 \le P_{G2}^2 - P_{G2}^1 \le \delta_2$$
(25)

Persamaan 3.18 dan 3.19 dapat dimasukan pada matriks ng baris pada waktu t dan t+1 sebagai berikut:

$$RR = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Secara utuh matriks A selama dua jam dapat digambarkan sebagai berikut:





2) Pemodelan Matriks H

Matriks H merupakan koefisien orde dua variabel kontrol dari fungsi objektif. Berdasarkan persamaan fungsi objektif quadratic programming, matriks H dikalikan dengan x^T dan x (variabel kontrol), maka besarnya matriks H adalah matriks simetris $n \times n$, dengan n sejumlah variabel kontrol. Matriks H dengan periode 1 jam pada sistem 3 bus seperti diatas dapat dituliskan sebagai berikut:

Untuk matriks H dengan periode lebih dari satu jam, maka matriks H saat t+1 disusun secara diagonal dibawah matriks H saat t jam.

3) Pemodelan Matriks C

Matriks C merupakan koefisien linear orde satu variabel kontrol dari fungsi objektif (b_{it}) . Matriks C^T dapat dituliskan sebagai berikut:



Untuk matriks C dengan periode lebih dari satu jam, maka matriks C saat t+1 disusun secara vertikal dibawah matriks C saat t jam.

4) Pemodelan Vektor x, x_{max} dan x_{min}

Vektor x merupakan nilai yang akan dioptimasi yang harus memenuhi batasan yang sudah ditentukan. Vektor xmin dan xmax merupakan batas atas dan batas bawah dari variabel kontrol. Dengan persamaan quadratic programming, maka x_{min} dan x_{max} untuk satu jam dapat dinyatakan sebagai berikut:

I	θ_{1min}^{1}		$\left[\theta_{1}^{1} \right]$	רו		$\left[\theta_{1max}^{1} \right]$
	θ^1_{2min}		θ_2^1	I H	nb	$\theta_{2 max}^1$
	θ_{2min}^1	\leq	θ_2^1	L	\leq	θ_{2max}^1
	$P^{1}_{G1\ min}$		P_{G1}^1	L	ng	P_{G1max}^1
	$P_{G2\ min}^1$		P_{G2}^1	L	~~~	$P_{G2\ max}^1$

Untuk vektor x_{min} dan x_{max} dengan periode lebih dari satu jam, maka vektor x_{min} dan x_{max} saat t+1 disusun secara vertikal dibawah vektor x_{min} dan x_{max} saat t jam.

IV. SIMULASI DAN ANALISA

A. Validasi

Pada simulasi ini dilakukan dalam 3 kondisi untuk mengetahui validasi program dalam memenuhi batasan yang sudah ditetapkan. Kondisi tersebut adalah sebagai berikut :

1) Kondisi I

DOPF arus searah tanpa batasan ramp rate (\overline{a}) pembangkit dan batasan volume air pada unit hidro yang harus dihabiskan.

2) Kondisi II

DOPF arus searah dengan batasan *ramp rate* (σ) tanpa batasan volume air pada unit hidro yang harus dihabiskan.

3) Kondisi III

DOPF arus searah dengan batasan *ramp rate* ($_{\overline{o}}$) dan batasan volume air pada unit hidro yang harus dihabiskan.

Validasi dilakukan terhadap program menggunakan *case file* IEEE 30 bus, yang terdiri oleh 6 pembangkit dan 30 saluran. Pembangkit ke-6 pada *case file* tersebut diinisialkan sebagai pembangkit hidro. Profil beban yang digunakan sebagai berikut:



Total beban selama 24 jam adalah 5312.75 MW

B. Simulasi Kondisi I

Daya yang dibangkitkan oleh pembangkit pada kondisi I

TABEL 1. DAYA TERBANGKIT PADA KONDISI I

iam		Daya	yang dib	angkitkan	1 MW	
Jam	unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6
1-24	1165.5	1501.9	540.31	597.21	497.82	1009.9
Total			531	2.75		

Dari hasil simulasi diatas dapat diketahui bahwa daya yang dibangkitkan tiap unit tidak melebihi kapasitas maksimal dari setiap unit pembangkit. Hal ini membuktikan bahwa hasil simulasi memenuhi (P_{Gi} min \leq $P_{Gi} \leq P_{Gi}$ max). Selain itu, hasil tersebut juga membuktikan bahwa total pembangkitan daya aktif sama dengan beban daya aktif sesuai persamaan *power balance*. Namun hasil tersebut tidak memenuhi batasan *ramp rate* tiap pembangkit yang sebesar -5 MW $\leq \delta \leq 5$ MW.

Ramp rate yang terlanggar pada kondisi I :

TABEL 2. RAMP RATE PADA KONDISI I											
+	£11	Ramp Rate pembangkit (MW/jam)									
t t+1		unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6				
12	13	-5.05	-5.76	-4.64	-2	-5.22	-3.81				
17	18	8.73	10.36	-14.7	-6.47	-1.97	-5.41				
18	19	2.84	3.39	-6.18	0.62	-1.13	-1.43				
20	21	-11.19	-13.31	21.24	6.01	3.52	6.97				
22	23	3.63	4.15	3.16	1.33	3.41	5.14				

Berdasarkan dari tabel *ramp rate* pada kondisi I diketahui bahwa seluruh unit pembangkit melanggar batasan *ramp rate*. Pelanggaran *ramp rate* tertinggi terjadi oleh unit 3 pada *t*-20 sebesar 21.24 MW. Hal ini terjadi karena kenaikan dan penurunan beban yang signifikan.

Aliran daya pada kondisi I

	TABEL 3. ALIRAN DAYA PADAKONDISI I								
	dowi hua	ka hua	kapasitas	daya r	nengalir	(MW)			
	dari bus ke bus		saluran (MW)	jam 1	jam 16	jam 19			
30	15	23	16	9.8	13.4	16			
35	25	27	16	11.619	16	16			

Berdasarkan tabel di atas dapat diketahui bahwa program telah memenuhi batas kapasitas saluran. Dimana aliran daya mencapai batas maksimal pada kapasitas saluran terdapat pada saluran ke-30 jam ke-19 dan saluran ke-35 jam ke-16,19. Perbedaan daya yang mengalir pada saluran bergantung pada beban disetiap bus. Selain itu daya yang mengalir pada saluran menyesuaikan dengan jumlah beban yang ada untuk memenuhi batasan *power balance*.

C. Simulasi Kondisi II

Daya yang dibangkitkan oleh pembangkit pada kondisi II :

TABEL 4. DAYA TERBANGKIT PADA KONDISI II
--

iam		Daya	yang diba	angkitkan	MW	
Jam	unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6
1-24	1141.1	1472.3	540.31	618.64	592.81	484.14
Total			531	2.72		

Dari hasil simulasi diatas dapat dilihat bahwa dengan profil beban yang sama, total daya yang dibangkitkan tidak ada perbedaan yang signifikan dengan kondisi I. *Ramp rate* maksimal pada kondisi II :

TADEL	5	PAMD	DATEDADA	VONDISI

TABLE S. MAMI KATETADA KONDISTII									
4	4.1	Ramp Rate pembangkit (MW/jam)							
ι	ι+1	unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6		
12	13	-5	-5	-4.99	-2.16	-5	-4.33		
15	16	1.77	2.01	-5	0.63	1.62	2.76		
16	17	-2.07	-1.9	-5	-2.76	-4.14	-4.93		
17	18	4.81	5	-5	-5	-5	-4.27		
18	19	2.22	3.65	-5	-0.66	-0.68	-1.43		
20	21	-2.37	-4.38	5	5	5	5		
21	22	-0.87	-1	5	3.88	5	5		
22	23	3.01	3.45	5	0.97	3.38	5		
23	24	-0.16	-0.19	5	-0.05	-0.13	5		

Dari tabel diatas diketahui bahwa program mampu membatasi kenaikan maupun penurunan daya yang dibangkitan dalam $-5 \le z \le 5$ MW. Data diatas merupakan nilai *ramp rate* maksimal oleh unit ke-*i* pada jam ke-*i*.

Aliran daya pada kondisi II

	TABEL 6. ALIRAN DAYA PADAKONDISI I						
	dani hua	daya	mengalir	(MW)			
	uari bus	ke bus	saluran (MW)	jam 1	jam 16	jam 19	
30	15	23	16	9.8	10.65	16	

Berdasarkan tabel aliran daya program masih berjalan dengan baik. Karena daya yang mengalir masih berada dalam batas saluran. Daya mengalir pada kapasitasa saluran maksimal terdapat pada saluran ke-30, jam ke-19. Dari 3 variabel yang di analisa daya yang dibangkitkan, *ramp rate*, kapasitas saluran program mampu mendapatkan hasil yang diinginkan.

D. Simulasi Kondisi III

Simulasi pada kondisi III merupakan simulasi terakhir dr program dengan menambahkan batasan pada unit hidro. Batasan tersebut berupa volume air yang harus dihabiskan unit hidro selama 24 jam. Dalam hal ini pembangkit ke-6 pada case IEEE 30 bus di inisialkan sebagai unit hidro dengan menganggap *cost function* = 0. Berikut adalah daya yang di bangkitkan pada kondisi ke III : (26)

	TABEL 7. DAYA TERBANGKIT PADA KONDISI III						
		Daya	a yang diba	angkitkan	MW		
jam	unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit hidro	
1-24	1215.9	1557.9	676.56	616.9	545.22	700	
Total			531	2.67			

Tidak terjadi selisih daya yang terbangkit dengan dua kondisi sebelumnya. Selanjutnya adalah analisa unit hidro dimana total daya yang dibangkitkan harus sama dengan volume air hidro. Sesuai dengan persamaan :

$$15_{ph} + 300 = Q$$

Dalam hal ini volume air untuk membangkitkan unit hidro adalah sebesar 17700 acre-feet. Berikut adalah daya yang dibangkitkan oleh unit hidro:

TABEL	4.8 Daya ya	NG DIBANGKIT	KAN UNIT HIDRO
jam	daya MW	persamaan	Q (acre-feet)
1	8.53	15ph +300	427.95
2	7.13	15ph +300	406.95
3	5.73	15ph +300	385.95
4	10.64	15ph +300	459.6
5	12.75	15ph +300	491.25
6	12.75	15ph +300	491.25
7	16.26	15ph +300	543.9
8	19.07	15ph +300	586.05
9	20.47	15ph +300	607.05
10	20.47	15ph +300	607.05
11	23.87	15ph +300	658.05
12	28.87	15ph +300	733.05
13	33.87	15ph +300	808.05
14	31.91	15ph +300	778.65
15	36.91	15ph +300	853.65
16	41.91	15ph +300	928.65
17	46.91	15ph +300	1003.65
18	51.91	15ph +300	1078.65
19	53.34	15ph +300	1100.1
20	53.34	15ph +300	1100.1
21	48.34	15ph +300	1025.1
22	43.34	15ph +300	950.1
23	38.34	15ph +300	875.1
24	33.34	15ph +300	800.1
	Total		17700

Dari tabel 4.7 dapat dilihat bahwa total daya yang di bangkitkan sama dengan jumlah debit air yang dihabiskan

Ramp rat	e maksimal	pada	kondisi	III
----------	------------	------	---------	-----

TABEL 9. RAMP RATE PADA KONDISI III							
4	£1.1	Ramp Rate pembangkit (MW/jam)					
ι	ι+1	unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit hidro
11	12	0.5	0.57	0.39	0.16	-0.39	-5
12	13	-4.26	-4.84	-4.99	-2.41	-5	-5
14	15	3.42	3.91	-0.47	1.09	2.73	-5
15	16	4.22	4.83	-5	1.35	3.38	-5
16	17	-1.96	-1.68	-5	-2.68	-4.48	-5
17	18	5	5	-5	-5	-4.46	-5
18	19	2.18	3.69	-5	-0.66	-0.68	-1.43
20	21	-2.37	-4.38	5	5	5	5
21	22	-0.87	-1	5	3.88	5	5
22	23	3.01	3.45	5	0.97	3.38	5
23	24	-0.16	-0.19	5	-0.05	-0.13	5

Dari data diatas dapat diketahui bahwa program masih memenuh batasan berupa *ramp rate* maupun volume air pada unit hidro.

Sedangkan untuk aliran daya dapat dilihat pada tabel berikut:

TABEL 10. ALIRAN DAYA PADAKONDISI III						
	dani hua	ke bus	kapasitas	daya mengalir (MW)		
	uari bus		saluran (MW)	jam 1	jam 16	jam 19
29	21	22	32	18.5	24	32
30	15	23	16	9.2	10.65	16
35	25	27	16	1.857	14.52	16

Dengan penambahan unit hidro pada kondisi ke III ini aliran daya masih berada dalam batasan kapasitas saluran. Aliran daya pada saluran ke 29,30,35 pada jam ke-19 mencapai batasan maksimal kapasitas saluran.

Berikut adalah kurva pembebanan pada kondisi III:



E. Biaya Total Sistem

Berdasarkan dari hasil simulasi pada 3 kondisi yang telah dilakukan, didapatkan total biaya yang berbeda. Berikut adalah total biaya pada setiap kondisi:

TABEL 11 . ALIRAN DAYA PADAKONDISI III				
Kondisi	Program	Total Biaya (\$)		
Ι	DOPF arus searah tanpa batasan ramp rate	16666		
II	DOPF arus searah dengan batasan ramp rate	16698		
III	DOPF arus searah dengan batasan ramp rate, dan penambahan unit hidro	11731		

Dari data diatas dapat dilihat bahwa selisih biaya pada kondisi I dengan kondisi II yaitu penambahan batasan *ramp rate* hanya sedikit. Sedangkan saat penambahan unit hidro pada kondisi II biaya dapat ditekan. Mengingat biaya pembangkitan unit hidro yang sangat murah.



Gambar 5. Single line IEEE 30 bus

- Bus 1 : Terhubung Termal 1
- Bus 2 : Terhubung Termal 2
- Bus 22 : Terhubung Termal 3
- Bus 27 : Terhubung Termal 4
- Bus 23 : Terhubung Termal 5
- Bus 13 : Terhubung Unit Hidro

V. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dan analisa diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- 1. Batasan *power balance* dan batasan kapasitas saluran merupakan hal utama yang dapat dipenuhi program *DOPF* arus searah pada tugas akhir ini.
- 2. *Ramp rate* merupakan batasan yang berkaitan dengan kapasitas fisik dari pembangkit, yang apabila tidak terpenuhi akan mengganggu kinerja pembangkit dalam kurun waktu tertentu. Program *DOPF* arus searah yang dibuat dapat memenuhi batasan *ramp rate* tersebut.
- Berdasarkan program yang telah dibuat, unit hidro mampu menghabiskan volume air yang tersedia dalam pembangkitan selama 24 jam.
- 4. Dengan penambahan satu unit hidro, total biaya pembangkitan dapat ditekan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Muchlis, Moch., Adhi Darma Permana. "Proyeksi Kebutuhan Listrik PLN", Jakarta, 2004.
- [2] Pusat Teknologi Pengembangan Sumber Daya Energi (PTPSE), "OUTLOOK ENERGI INDONESIA 2015", Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), Jakarta, 2015
- [3] Wibowo, Rony Seto, Nursidi, IGN Satriyadi H, Uman DF P, Adi Adi Soeprijanto, and Ontoseno Ontoseno Penangsang. "Dynamic DC Optimal Power Flow Using Quadratic Programming", 978-1-4799-0425-9/13 @2013 IEEE. Surabaya, 2013.
- [4] Saadat, Hadi, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1999
- [5] Wood, Allen J, "Power Generation, Operation, and Control", John Wiley & Sons, New York, 1996.

- [6] Momoh James, A., El-Hawary, M.E, Adapa, R., "A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993. Part II: Newton, Linear Programming, and Interior Point Methods", IEEE Trans, Power Sys., 1999, vol.14, pp.105-111, Januari, 1999.
- [7] Cain, Mary B., O'Neill, Richard P., Castillo, Anya, "History of Optimal Power Flow and Formulations", Desember 2012
- [8] Carpentier, J, "Optimal Power Flows" Paris, IPC Business Press, Vol 1, No 1, April, 1979.
- [9] T Nikman, MR Narimani, J Ahgei, S Tabatabei, M Nayeripour, Modified Honey Bee Mating Optimization to Solve Dynamic Optimal Power Flow Considering Generator Constraints, IET Generation, Transmission and Distribution, Vol.5, No.10, pp.989-1002, Januari 2011.
- [10] Jensen, Paul A., Bard, Jonathan F., "Operations Research Models and Methods", Wiley, 2002.
- [11] Simoes Costa A, Uturbey W, "Dynamic Optimal Power Flow Approach to Account for Consumer Response in Short term hydrotermal coordination studies" IET Generation, Transmission and Distribution, 2007.
- [12] Ameli, Mohammad Taghi, Moslehpour, Saeid, Golnazsadat, Mahdavikhah, "Determining the Spinning Reserve In Power Systems By Corrected Recursove PJM Method", Proc. of the 2008 IAJC-IJME International Conference, 2008.

BIOGRAFI PENULIS



Rasyid Wahyu Wijaya, lahir di kota Klaten pada tanggal 12 Oktober 1992. Penulis memulai jenjang pendidikan di-SDN 2 Somopuro, SMPN 1 Prambanan, dan SMAN 2 Klaten. Kemudian penulis menyelesaikan program diploma tiga (D3) di Universitas Gadjah Mada

dengan jurusan teknik elekro dengan program studi teknik listrik. Dan saat ini tengah menempuh program strata satu (S1) di Institut Teknologi Sepuluh November dengan jurusan teknik elektro, bidang studi teknik sistem tenaga.