

Dynamic Economic Dispatch

Mempertimbangkan Rugi-Rugi Transmisi Menggunakan *Quadratically Constrained Quadratic Program*

Kresna Bayu Ar-razi Arifin, Rony Seto Wibowo, dan Ni Ketut Aryani

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro

Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) 60111 Indonesia

e-mail: kresnabayuarr@gmail.com, ronyseto@ymail.com, ketut.aryani@gmail.com

Abstrak—Optimasi pada pembangkitan energi listrik sangat diperlukan agar energi listrik yang dibangkitkan sesuai dengan kebutuhan yang ada. Salah satu cara optimasi adalah *Dynamic Economic Dispatch (DED)*. *DED* adalah pengoptimalan pembangkit listrik untuk memperoleh biaya pembangkitan minimal terhadap permintaan beban berdasarkan periode waktu dan beban tertentu. Salah satu faktor yang mempengaruhi pengoptimalan sistem tenaga listrik adalah rugi-rugi daya pada saluran transmisi. Rugi-rugi daya pada saluran transmisi dapat menyebabkan pembangkitan energi listrik harus lebih tinggi daripada permintaan beban untuk mengatasi daya yang hilang pada saluran transmisi, sehingga dapat meningkatkan biaya pembangkitan energi listrik pada sistem. Pada studi ini menggunakan metode *Quadratically Constrained Quadratic Program (QCQP)* untuk menghitung biaya minimum pembangkitan energi listrik terhadap permintaan beban dengan mempertimbangkan rugi-rugi transmisi dan menggunakan batasan *ramp rate* dari unit pembangkit.

Kata Kunci—Biaya Pembangkitan, *Dynamic Economic Dispatch*, *Quadratically Constrained Quadratic Program*, *Ramp Rate Rugi-Rugi Daya*.

I. PENDAHULUAN

KETERSEDIAAN bahan bakar fosil yang tidak dapat diperbaharui seperti minyak bumi dan batu bara setiap hari semakin menipis. Hal ini menjadi masalah bagi ketersediaan energi listrik. Mengingat pembangkit thermal berbahan bakar fosil masih menjadi sumber tenaga listrik yang utama di Indonesia. Saat ini seluruh masyarakat di dunia membutuhkan listrik sebagai penopang hidupnya. Optimasi tenaga listrik sangat dibutuhkan untuk dapat memanfaatkan energi listrik dengan optimal. Sehingga dibutuhkan regulasi baru untuk keamanan, kestabilan, dan operasi ekonomis dalam sistem tenaga listrik[1]. *Economic Dispatch (ED)* merupakan salah satu bentuk optimasi sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk memperoleh operasi pembangkitan yang ekonomis[2]. *ED* konvensional hanya dapat digunakan pada satu level beban[3]. *Dynamic Economic Dispatch (DED)* merupakan pengembangan dari *ED* konvensional, karena *DED* dapat digunakan pada level beban yang berubah-ubah.

Banyak faktor yang dapat menyebabkan sistem menjadi tidak optimal, salah satunya adalah rugi-rugi transmisi. Rugi-rugi transmisi timbul akibat penyaluran daya menuju beban pada saluran transmisi, sehingga daya yang akan diterima oleh beban akan berkurang. Oleh karena itu rugi-rugi transmisi harus diperhitungkan agar daya yang diterima oleh

beban sesuai dengan kebutuhan daya beban. Banyak studi telah dilakukan untuk mendapatkan rugi-rugi transmisi yang akurat dan efisien pada penjadwalan pembangkitan[4]. Dalam *Dynamic Economic Dispatch* biasa ditemui fungsi dan batasan non linier. Oleh karena itu dibutuhkan pendekatan yang tepat dan akurat untuk dapat menyelesaikan *Dynamic Economic Dispatch*. Pada studi ini digunakan metode *Quadratically Constrained Quadratic Program (QCQP)* untuk menyelesaikan *Dynamic Economic Dispatch* dengan mempertimbangkan rugi-rugi transmisi.

Simulasi yang akan digunakan menggunakan *Toolbox OPTI* pada software MATLAB. Penggunaan *OPTI* disini untuk mempermudah perhitungan karena pada *OPTI* sudah terdapat toolbox optimasi *Quadratically Constrained Quadratic Program*

II. DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH

A. Economic Dispatch (ED)

Economic Dispatch atau pembebanan ekonomis merupakan pembagian pembebanan daya yang harus dibangkitkan oleh unit pembangkit dalam suatu sistem tenaga listrik sehingga dapat memenuhi kebutuhan beban dengan biaya minimum yang sesuai dengan nilai permintaan beban sistem. Dengan penerapan *economic dispatch*, akan didapatkan biaya pembangkitan yang minimum terhadap produksi daya listrik yang dibangkitkan oleh unit-unit pembangkit pada suatu sistem tenaga listrik. Setiap unit pembangkit memiliki karakteristik input-output yang berbeda-beda dan memiliki batas maksimum dan minimum daya pembangkitan masing-masing. Fungsi karakteristik input-output dari pembangkit termal dapat dituliskan oleh persamaan polinomial orde dua yaitu :

$$F_h(P_h) = a_h P_h^2 + b_h P_h + c_h \quad (1)$$

$$P_{h,min} \leq P_h \leq P_{h,maks} \quad (2)$$

B. Dynamic Economic Dispatch (DED)

Dynamic economic dispatch merupakan pengembangan dari *economic dispatch*. *Dynamic economic dispatch* adalah pembagian pembebanan daya yang harus dibangkitkan oleh unit pembangkit dalam suatu sistem tenaga listrik sehingga dapat memenuhi kebutuhan beban dengan biaya minimum dalam rentang periode waktu tertentu. Nilai permintaan beban pada suatu sistem tenaga listrik selalu berubah-ubah (dinamis) setiap periode waktu tertentu, oleh karena itu untuk mensuplai beban secara ekonomis pada tiap periode waktu-*t*

untuk setiap h -unit generator perhitungan optimisasi *dynamic economic dispatch* dilakukan. Sehingga fungsi biaya pembangkitan dari *DED* menjadi :

$$F_{ht}(P_{ht}) = a_h P_{ht}^2 + b_h P_{ht} + c_h \quad (3)$$

Dari persamaan (3) terlihat fungsi biaya pembangkitan dari generator berubah-ubah sesuai dengan t periode. Setiap unit pembangkit memiliki batasan maksimum daya yang dibangkitkan pada interval waktu tertentu atau disebut juga *ramp rate*

$$DR_h \leq P_{ht} - P_{ht-1} \leq UR_h \quad (4)$$

C. Transmisi dan Rugi-Rugi Transmisi

Aliran daya aktif pada saluran transmisi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut. :

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j [g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (5)$$

Daya listrik yang disalurkan melalui saluran transmisi mengalami rugi daya, hal ini disebabkan karena saluran transmisi mempunyai tahanan, induktansi dan kapasitansi. Rugi-rugi daya pada saluran transmisi dapat dinyatakan dengan :

$$P_{lij} = P_{ij} + P_{ji} \quad (6)$$

Dalam penelitian ini, dilakukan penyederhanaan pada (5) dan (6), dimana pada operasi normal saluran transmisi tegangan tinggi, perbedaan sudut fasa sangatlah kecil, sehingga nilai $\sin(\theta_i - \theta_j) = 0$, sehingga :

$$P_{lij} = (V_i^2 + V_j^2)g_{ij} - 2V_i V_j g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (7)$$

Pada operasi normal tegangan tinggi, nilai tegangan dari bus mendekati 1 p.u sehingga :

$$P_{lij} = 2g_{ij} - 2g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (8)$$

Karena perbedaan sudut fasa sangatlah kecil, dapat dilakukan pendekatan menggunakan deret taylor pada fungsi cosinus:

$$\cos(\theta_i - \theta_j) \approx 1 - 0.5(\theta_i - \theta_j)^2 \quad (9)$$

Sehingga jika dilakukan substitusi (9) kedalam (8) akan menjadi :

$$P_{lij} \approx g_{ij}(\theta_i - \theta_j)^2 \quad (10)$$

D. DC Power Flow

DC power flow merupakan penyederhanaan dari sistem *AC power flow*. Sistem *DC power flow* hanya memperhitungkan daya aktif, sedangkan daya reaktif diabaikan[5]. Selain itu diasumsikan nilai dari magnitude tegangan $|V_i| = 1.0$ p.u. Aliran daya pada setiap saluran pada metode *DC power flow* ini adalah,

$$P_{ij} = \frac{1}{x_{ij}} (\theta_i - \theta_j) \quad (11)$$

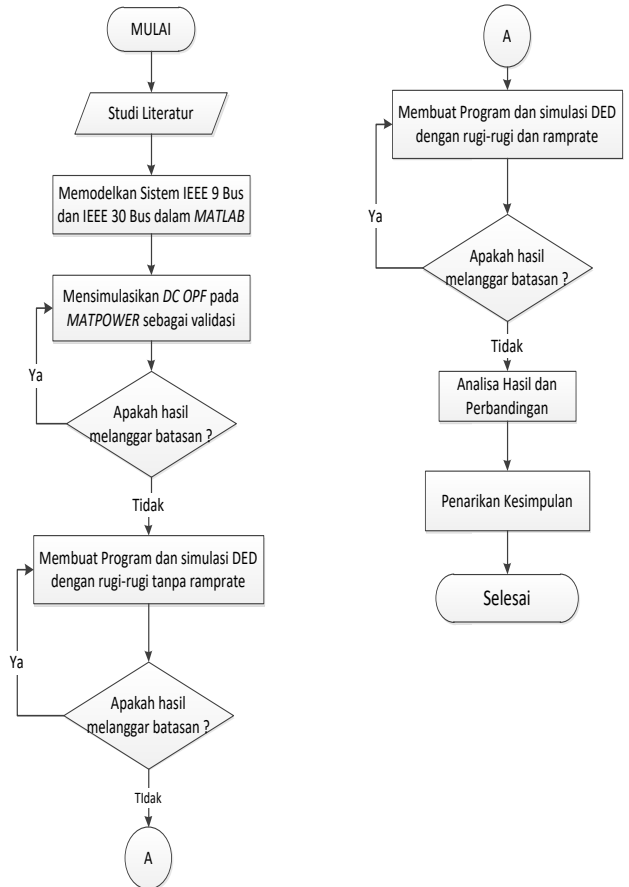
dan daya pada setiap bus i adalah,

$$P_i = \sum_j P_{ij} = \sum_k \frac{1}{x_{ik}} (\theta_i - \theta_k) \quad (12)$$

III. PERANCANGAN SISTEM

Pada penelitian ini, *Dynamic Economic Dispatch* diselesaikan menggunakan metode *Quadratically Constrained Quadratic Program* dengan mempertimbangkan rugi-rugi transmisi. Pemodelan sistem dan simulasi dilakukan menggunakan *Toolbox OPTI* pada software *MATLAB*.

Diagram alir dari algoritma yang digunakan dalam penyelesaian studi ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Penyelesaian Studi

A. Fungsi Objektif dan Batasan

Nilai fungsi objektif sebagai fungsi kuadratik yang berasal dari koefisien biaya tiap pembangkit akan diproses oleh *quadratically constrained quadratic program* dengan persamaan sebagai berikut :

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{G=1}^n (a_G^t P_G^{t2} + b_G^t P_G^t + c_G^t) \right) \quad (13)$$

Dimana :

- $a, b, \text{ dan } c$: koefisien biaya generator
- P_G^t : daya yang dibangkitkan pembangkit h pada periode waktu t (MW)

Fungsi objektif tersebut dibatasi oleh batasan-batasan (*constraints*) sebagai berikut :

- 1) *Linear Equality Constraints*
Active Power Balance

$$P_{Di}^t - P_{Gi}^t + P_{lij}^t = 0 \quad (14)$$

DC Power Flow

$$\frac{P_{lij}^t - P_{ji}^t}{2} = \frac{1}{x_{ij}} [\theta_i^t - \theta_j^t] \quad (15)$$

Dimana :

- P_{lij} : Daya yang mengalir pada saluran dari bus i ke bus j ,
- P_{Di} : Daya pada load bus i
- P_{Gi} : Daya pembangkitan generator pada bus i
- θ : Sudut tegangan
- x : Reaktansi saluran

Slack Bus

$$\theta_{slack} = 0 \tag{16}$$

2) Linear Inequality Constraints
Ramp Rate

$$-P_{RD_i} \leq P_{Gi}^t - P_{Gi}^{t-1} \leq P_{RU_i} \tag{17}$$

Daya Pembangkitan

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \tag{18}$$

Kapasitas Saluran Transmisi

$$P_{lijmin} \leq \frac{P_{lij}^t - P_{lji}^t}{2} \leq P_{lijmax} \tag{19}$$

3) Quadratic Constraints

Rugi-rugi transmisi

$$-P_{lij}^t - P_{lji}^t + g_{ij}(\theta_i^t - \theta_j^t)^2 = 0 \tag{20}$$

B. Quadratically Constrained Quadratic Program (QCQP)

Quadratically Constrained Quadratic Program merupakan pengembangan dari Quadratic programming. Dimana pada Quadratically Constrained Quadratic Program batasan-batasan (constraint) tidak hanya berupa batasan linier namun juga dapat berupa batasan kuadrat (Quadratic Constraint)

Fungsi objektif dari Quadratically Constrained Quadratic program dimodelkan dalam sebuah persamaan berikut:

$$F(x) = f + c^T x + \frac{1}{2} x^T H x \tag{21}$$

Batasan (constraints) linier dari Quadratically Constrained Quadratic Program dimodelkan sebagai berikut :

$$lb \leq Ax \leq Ub \tag{22}$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \tag{23}$$

Sedangkan untuk batasan kuadrat (quadratic constraints) dimodelkan sebagai berikut:

$$rl \leq l^T x + x^T Q x \leq ru \tag{24}$$

Dimana :

- f = konstanta skalar
- c = konstanta matriks n -vektor
- H = matriks $n \times n$
- A = matriks $m \times n$
- ub, lb = konstanta m -vektor
- Q = matriks $n \times n$
- l = matriks $k \times n$
- rl, ru = konstanta, k -vektor
- x = n -vektor yang nilainya akan dioptimasi

IV. SIMULASI DAN ANALISIS

A. Sistem IEEE 9 Bus

Simulasi dan analisa pada sistem IEEE 9 Bus dibagi menjadi 2 studi kasus yaitu :

1. DED mempertimbangkan rugi-rugi transmisi tanpa menggunakan ramp rate.
2. DED mempertimbangkan rugi-rugi transmisi dengan menggunakan ramp rate.

Sebelum mensimulasikan studi kasus, akan dilakukan simulasi DC OPF tanpa mempertimbangkan rugi-rugi transmisi dan tanpa mempertimbangkan ramp rate dengan menggunakan MATPOWER. Hasil dari simulasi ini akan

digunakan sebagai pembandingan hasil simulasi studi kasus nantinya.

Sebelum dilakukan simulasi pada sistem, profil pembebanan harus direncanakan terlebih dahulu. Total beban yang akan disimulasikan bersifat dinamis (berubah-ubah) berdasarkan waktu, hal ini merupakan implementasi dari dynamic economic dispatch. Profil pembebanan sistem dari simulasi sistem IEEE 9 Bus dapat dilihat melalui Tabel 1 :

Tabel 1.
Profil Pembebanan Sistem IEEE 9 Bus

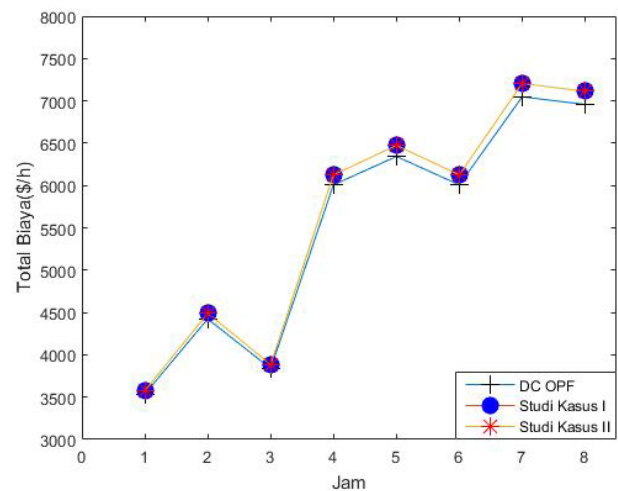
Jam ke-	Beban yang terpenuhi (MW)			Total (MW)
	Bus 5	Bus 7	Bus 9	
1	67.5	75	93.75	236.25
2	80.1	89	111.25	280.35
3	72	80	100	252
4	99	110	137.5	346.5
5	102.6	114	142.5	359.1
6	99	110	137.5	346.5
7	109.8	122	152.5	384.3
8	108.9	121	151.25	381.15

Setelah dilakukan simulasi DED sesuai dengan profil pembebanan, maka didapatkan hasil seperti yang tertera pada Tabel 2:

Tabel 2.
Hasil Simulasi Sistem IEEE 9 Bus

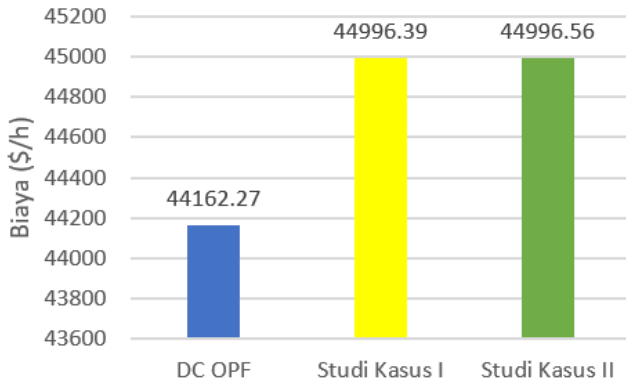
No	Simulasi	Daya Terbangkit (MW)	Rugi-rugi (MW)	Total Biaya (\$/h)
1	DC OPF	2586.15	0	44162.27
2	Studi Kasus 1	2618.0055	31.8552	44996.39
3	Studi Kasus 2	2618.0107	31.8606	44996.56

Sedangkan untuk perbandingan biaya pembangkitan perjamnya tertera pada gambar berikut :



Gambar 2. Grafik Perbandingan Biaya Pembangkitan Perjam Sistem IEEE 9 Bus

Grafik perbandingan total biaya dari 3 simulasi tersebut tertera pada gambar berikut



Gambar 3. Perbandingan Total Biaya Sistem IEEE 9 Bus

Terlihat pada Tabel 2 dan Gambar 2 bahwa biaya pembangkitan paling murah adalah pada *DC OPF*, karena pada *DC OPF* rugi-rugi transmisi diabaikan dan batasan *ramp rate* tidak digunakan. Sedangkan biaya pembangkitan paling mahal adalah pada studi kasus II, hal ini karena studi kasus II mempertimbangkan rugi-rugi transmisi dan menggunakan batas *ramp rate*.

B. Sistem IEEE 30 Bus

Pada sistem IEEE 30 Bus akan disimulasikan dua studi kasus dengan tiap studi kasusnya sama dengan studi kasus pada sistem IEEE 9 Bus. Pada sistem ini juga akan dilakukan simulasi *DC OPF* terlebih dahulu yang hasilnya nanti akan digunakan sebagai pembandingan dari hasil simulasi studi kasus. Profil pembebanan untuk simulasi sistem IEEE 30 Bus ditunjukkan oleh Tabel 3

Tabel 3. Profil Pembebanan Sistem IEEE 30 Bus

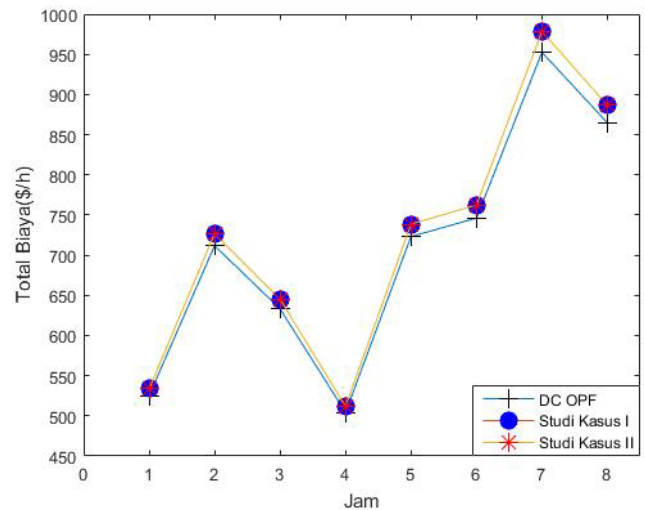
Jam	Total Beban (MW)	Jam	Total Beban (MW)
1	178.542	5	229.554
2	226.72	6	235.222
3	206.882	7	283.4
4	172.874	8	263.562

Setelah dilakukan simulasi *DED* sesuai dengan profil pembebanan, maka didapatkan hasil seperti yang tertera pada Tabel 4:

Tabel 4. Hasil Simulasi Sistem IEEE 30 Bus

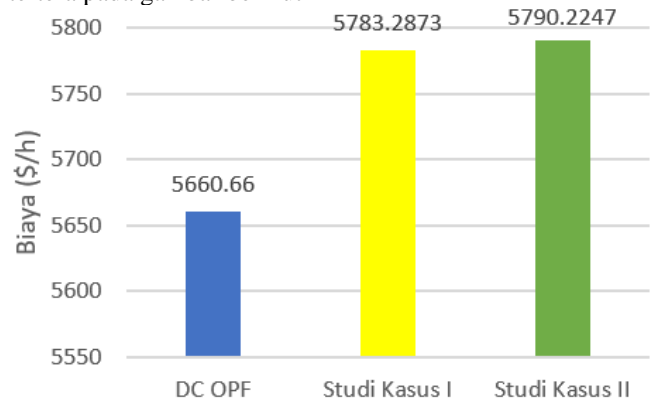
No	Simulasi	Daya Terbangkit (MW)	Rugi-rugi (MW)	Total Biaya (\$/h)
1	<i>DC OPF</i>	1796.74	0	5660.66
2	Studi Kasus 1	1826.1644	29.4	5783.2873
3	Studi Kasus 2	21826.2589	29.5	5790.2247

Sedangkan untuk perbandingan biaya pembangkitan perjamnya tertera pada gambar berikut :



Gambar 4. Grafik Perbandingan Biaya Pembangkitan Perjam Sistem IEEE 30 Bus

Grafik perbandingan total biaya dari 3 simulasi tersebut tertera pada gambar berikut



Gambar 4. Perbandingan Total Biaya Sistem IEEE 30 Bus

Sama seperti pada Sistem IEEE 9 Bus bahwa biaya pembangkitan paling murah adalah pada *DC OPF*, karena pada *DC OPF* rugi-rugi transmisi diabaikan dan batasan *ramp rate* tidak digunakan. Sedangkan biaya pembangkitan paling mahal adalah pada studi kasus II, hal ini karena studi kasus II mempertimbangkan rugi-rugi transmisi dan menggunakan batas *ramp rate*.

V. KESIMPULAN

Dengan menggunakan sistem IEEE 9 Bus dan IEEE 30 Bus, program *dynamic economic dispatch* yang disusun melalui *MATLAB* dan *OPTI Toolbox* telah mampu melakukan perhitungan *dynamic economic dispatch* dengan memberikan hasil keluaran daya yang minimal dengan mempertimbangkan rugi-rugi transmisi.

Dari hasil simulasi, rugi-rugi transmisi menyebabkan total daya yang dibangkitkan menjadi lebih besar. Pada simulasi sistem IEEE 9 Bus studi kasus I, total daya yang dibangkitkan lebih besar 31.8552 MW, sedangkan pada simulasi sistem IEEE 30 Bus studi kasus I 29.4 MW jika dibandingkan dengan *DC OPF*.

Dari hasil simulasi, rugi-rugi transmisi menyebabkan total biaya pembangkitan menjadi lebih besar dari awalnya. Dengan mempertimbangkan rugi-rugi transmisi, biaya pembangkitan pada sistem IEEE 9 Bus lebih besar 834.1\$, sedangkan pada sistem IEEE 30 Bus 122.62\$ jika dibandingkan dengan *DC OPF*.

Dari hasil simulasi, *ramp-rate* menyebabkan total biaya pembangkitan menjadi lebih mahal. Pada simulasi sistem IEEE 9 Bus studi kasus II total biaya pembangkitan lebih besar 0.17\$ sedangkan pada sistem IEEE 30 Bus lebih besar 6.93 \$ jika dibandingkan dengan studi kasus I.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Yan, Z. X. Xing, W. Li, and B. Zhang, "Economic dispatch application of power system with energy storage systems," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 7, pp. 1–5, 2016.
- [2] D. Ross and S. Kim, "Dynamic economic dispatch of generation," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-99, no. 6, pp. 2060–2068, Nov. 1980.
- [3] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power generation, operation, and control*, 2nd ed. New York: J. Wiley & Sons, 1996.
- [4] H. Zhong, Q. Xia, Y. Wang, and C. Kang, "Dynamic economic dispatch considering transmission Losses Using quadratically constrained quadratic program method," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 2232–2241, Aug. 2013.
- [5] Y. B. N. Wigaswara, "Aliran daya optimal dengan batas keamanan sistem mempertimbangkan energy storage," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.