

Penjadwalan Unit Pembangkit Termal, Sel Surya dan Baterai Menggunakan Metode MIQP

Galih Yudhaprawira¹, Sarjiya²

Abstract—The use of renewable energy to support the power system operation is a way to reduce the energy dependence from fossil resources. Photo voltage (PV) is one of renewable energy suitable used in tropical area because of the availability of adequate sunlight. One of the problems when PVs are interconnected to thermal generation system is how to determine the committed thermal units to serve the load. In this paper, the unit commitment problems of generation system including PVs and battery are solved using Mixed Integer Quadratic Programming (MIQP). Three simulation scenarios are reported which represent the impact of involving PVs and battery in total operation cost. When PVs are involved in the scheduling, they could reduce the power generated by thermal unit as well as total operation cost. Similarly, when battery units are involved, the battery capability to store and release energy also could reduce total operation cost.

Intisari— Penggunaan energi terbarukan untuk mendukung operasi sistem tenaga merupakan salah satu cara untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya fosil. Sel surya adalah salah satu energi terbarukan yang cocok untuk digunakan di daerah tropis karena ketersediaan sinar matahari. Salah satu masalah ketika sel surya diinterkoneksi dengan sistem pembangkit termal adalah bagaimana menentukan unit termal yang berkomitmen untuk melayani permintaan daya beban. Masalah unit commitment dari sistem pembangkit termal termasuk sel surya dan baterai dipecahkan menggunakan *Mixed Integer Quadratic Programming (MIQP)*. Penelitian menggunakan tiga skenario merepresentasikan pengaruh dilibatkannya sel surya dan baterai terhadap biaya total operasi. Ketika sel surya dilibatkan dalam penjadwalan, daya yang dibangkitkan oleh unit pembangkit termal berkurang yang juga berdampak pada biaya total operasi. Hasil yang sama didapatkan ketika unit baterai dilibatkan. Kemampuan baterai untuk menyimpan dan menyuplai energi juga dapat mengurangi biaya total operasi.

Kata Kunci— *unit commitment*, sel surya, baterai, *MIQP*, biaya total operasi.

I. PENDAHULUAN

Krisis energi yang terjadi akhir-akhir ini dikarenakan oleh ketergantungan pada energi tidak terbarukan. Penggunaan energi terbarukan dianggap sebagai salah satu strategi untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Salah satu energi terbarukan yang dipilih karena bersih, praktis, mempunyai masa pakai yang panjang dan sesuai untuk

wilayah tropis adalah sel surya. Namun sel surya memiliki kelemahan berupa daya keluarannya yang berfluktuasi tergantung pada kondisi cuaca. Pembagian pembangkitan energi listrik antara pembangkit konvensional dengan pembangkitan dari energi terbarukan harus dijaga untuk mempertahankan keseimbangan permintaan daya dari beban dengan daya yang dibangkitkan [1].

Peningkatan jumlah pembangkit listrik independen yang lokasinya tersebar menyebabkan berbagai resiko ketika terjadi interkoneksi, terutama pada faktor keandalan. Daya optimal yang diijinkan untuk berinterkoneksi dengan sistem harus ditentukan sehingga dapat menjaga keandalan sistem [2]. *Unit commitment (UC)* digunakan untuk mendapatkan keluaran daya dalam periode harian hingga mingguan tanpa melanggar kekangan sistem dan kekangan unit pembangkit [3]. UC harus mampu mengkombinasikan pembangkitan daya listrik dari pembangkit listrik yang tersedia dan menjadwalkan daya keluarannya untuk memenuhi perkiraan beban tanpa melanggar kekangan dengan biaya minimum [4].

UC merupakan masalah optimisasi non linier dalam skala besar yang tidak dapat dipecahkan secara eksak [3]. Metode yang banyak digunakan untuk memecahkan masalah UC adalah *dynamic programming*, *Lagrangian relaxation*, *benders decomposition*, *mixed integer programming*, and *heuristic methods* [4].

Daya keluaran dari pembangkit terbarukan mengharuskan adanya *back-up* dari cadangan berputar sebagai kompensasi ketika terjadi penurunan daya. Energi yang dibangkitkan oleh sel surya harus digunakan sepenuhnya sewaktu siang hari dan bila memungkinkan disimpan dalam baterai untuk digunakan pada malam hari. Unit baterai dan karakteristiknya meningkatkan kompleksitas masalah penjadwalan.

Studi tentang penjadwalan jangka pendek pada sistem yang melibatkan sel surya/baterai dan berintegrasi pada *grid* menggunakan *Augmented Lagrangian Relaxation* dilaporkan dalam [5] dan [6]. Hasilnya menunjukkan bahwa penjadwalan jangka pendek yang dibatasi oleh kapasitas sel surya, kapasitas baterai, *minimum up* dan *minimum down time*, dan *ramp rate* dari unit termal. Studi mengenai penjadwalan jangka pendek dari sistem yang terdiri atas unit *diesel*, sel surya, *wind park* dan baterai dilakukan oleh [7] telah dipecahkan menggunakan *priority list* dan pemrograman dinamis. Algoritma genetis digunakan untuk memecahkan masalah penjadwalan jangka pendek untuk sistem yang terdiri atas unit *diesel*, sel surya, *wind park* dan baterai [8]. Penjadwalan jangka pendek pada sistem *microgrid* yang terdiri atas unit termal, sel surya, *wind park* dan baterai telah dilakukan oleh [3]. Metode yang digunakan adalah *Lagrangian relaxation*, algoritma genetis dan gabungan antara *Lagrangian relaxation* dengan algoritma genetis. Metode pencarian langsung digunakan untuk memecahkan penjadwalan *microgrid* dengan kekangan cadangan putar

¹ Mahasiswa Pascasarjana, Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55284 INDONESIA (tel: 0274-547506; fax: 0274-547506)

² Dosen, Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55284 INDONESIA (tel: 0274-547506; fax: 0274-547506; e-mail: widyawan@te.ugm.ac.id)

tambahan karena ketidakpastian dari keluaran energi terbarukan, keterbatasan kontrol antara area kontrol dan cadangan tambahan untuk stabilitas operasi dalam operasi pulau [9]. Studi tentang penjadwalan pembangkit dengan energi terbarukan yang terdiri atas sel surya, turbin angin, baterai dan *fuel cells* di Budapest Tech's dilakukan oleh [10]. Metode yang digunakan adalah *Mixed Integer Linier Programming* (MILP) dan dibandingkan dengan *Evolutionary Particle Swarm Optimization* (EPSO).

Paper ini mendiskusikan tentang operasi pembangkit dengan integrasi energi terbarukan berupa sel surya dan baterai. Algoritma yang digunakan adalah *Mixed integer Quadratic Programming* (MIQP).

II. MODEL OPTIMASI

A. Fungsi objektif

Fungsi objektif dari penjadwalan pembangkit adalah meminimisasi biaya operasional dari pembangkit termal yang meliputi biaya bahan bakar, biaya *start up* dan *shut down* seperti yang dirumuskan pada (1) [11].

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N f_i(P_i^t) u_i^t + SU_i^t + SD_i^t \quad (1)$$

Pada persamaan (1), N dan T merepresentasikan jumlah unit pembangkit dan periode penjadwalan pembangkit. $f_i(P_{g_i}^t)$ merupakan fungsi biaya pembangkitan dari unit i pada waktu t .

Biaya bahan bakar unit pembangkit termal dimodelkan sebagai fungsi kuadratis seperti pada persamaan (2).

$$f_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad \$/jam \quad (2)$$

Pada (2), a_i, b_i, c_i adalah koefisien fungsi biaya unit i (a_i dalam $\$/h$, b_i dalam $\$/MWh$ dan c_i dalam $\$/MW^2h$) dan $P_{g_i}^t$ merupakan daya yang dibangkitkan oleh unit i dalam waktu t (MW).

Fungsi biaya *start up* (SU_i^t) dirumuskan pada (3) [3]:

$$SU_i^t = \begin{cases} HS_i, & \text{jika } T_{i,off}^t \leq T_{i,down} + T_{i,cold} \\ CS_i, & \text{jika } T_{i,off}^t > T_{i,down} + T_{i,cold} \end{cases} \quad (3)$$

Pada (3), HST_i dan CST_i merupakan biaya *start up* panas dan biaya *start up* dingin pembangkit ($\$$). $T_{off,i}^t$ merupakan periode unit pembangkit tidak dinyalakan (jam). $T_{cold,i}$ merupakan waktu *cold start up* (jam) dan $T_{i,down}$ merupakan *minimum down time* unit pembangkit i (jam).

B. Kekangan

Sebelum menjabarkan kekangan dalam penjadwalan pembangkit, diberikan beberapa notasi berikut :

- P_t^D : daya yang dibutuhkan beban pada waktu t (MW)
- R^t : cadangan berputar yang dibutuhkan pada waktu t (MW)
- $P_{i,maks}$: batas daya mampu netto maksimum unit i (MW)
- $P_{i,min}$: batas daya mampu netto minimum unit i (MW)
- $T_{on,i}^t$: periode unit pembangkit dinyalakan (jam)

MUT_i : *minimum up time* unit i (jam)

MDT_i : *minimum down time* unit i (jam)

P_s^t : daya yang dibangkitkan oleh sel surya (MW)

\bar{P}_s^t : daya pembangkitan maksimum dari sel surya (MW)

U_i^t : status unit i pada periode t (1/0)

Kekangan operasi dalam penjadwalan pembangkit meliputi kekangan sistem dan kekangan unit pembangkit.

Kekangan sistem terdiri atas :

1) Keseimbangan daya

$$\sum_{i=1}^N P_i^t = P_t^D \quad (4)$$

2) Cadangan berputar

$$\sum_{i=1}^N P_{i,maks} u_i^t = P_t^D + R^t \quad (5)$$

Kekangan unit pembangkit terdiri atas :

1) Batasan pembangkitan pembangkit termal

$$P_{i,min} \leq P \leq P_{i,maks} \quad (6)$$

2) *Minimum up and down time*

$$\begin{aligned} (T_{on,i}^{t-1} - MUT_i)(U_i^{t-1} - U_i^t) &\geq 0 \\ (T_{off,i}^{t-1} - MDT_i)(U_i^t - U_i^{t-1}) &\geq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

3) Batasan pembangkitan untuk sel surya

$$P_s^t \leq \bar{P}_s^t \quad (8)$$

4) *State of Charge* (SOC)

Perbandingan jumlah energi yang ada pada saat tertentu terhadap kapasitas nilai nominal baterai. Baterai tidak boleh diisi melebihi kapasitas maksimumnya.

5) *Depth of Discharge* (DOD)

Jumlah energi yang dapat digunakan dari sebuah baterai sesuai dengan spesifikasi pabrik.

6) *Charging and Discharging rates*

Laju pengisian dan pengosongan, frekuensi *switching* antara pengisian baterai dan pengosongan dapat mempengaruhi umur baterai.

III. PENULISAN MQIP

Sebelumnya, pada [11] disebutkan bahwa formulasi *Mixed Integer Programming* untuk *minimum up time* dan *minimum down time* adalah sebagai berikut :

$$\sum_{t=1}^V [1 - u_i^t] = 0, \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$\sum_{q=t}^{t+MUT_i-1} u_i^q \geq MUT_i [u_i^t - u_i^{t-1}], \forall i \in I, \quad (10)$$

$$\forall t = V_i + 1 \dots T - MUT_{i+1}$$

$$\sum_{q=t}^T [u_i^q - (u_i^t - u_i^{t-1})] \geq 0, \forall i \in I, \quad (11)$$

$$\forall t = T - MUT_i + 2 \dots T$$

$$V_i = \text{Min}\{T, (MUT_i - T_{on,i}^0)u_i^0\} \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^{W_i} u_i^t = 0, \forall i \in I \quad (13)$$

$$\sum_{q=t}^{t+MDT_i-1} [1 - u_i^q] \geq MDT_i [u_i^{t-1} - u_i^t], \quad (14)$$

$$\forall i \in I, \forall t = W_i + 1 \dots T - MDT_i + 1$$

$$\sum_{q=t}^T [1 - u_i^q - (u_i^{t-1} - u_i^t)] \geq 0, \quad (15)$$

$$\forall i \in I, \forall t = T - MDT_i + 2 \dots T$$

$$W_i = \text{Min}\{T, (MDT_i - T_{off,i}^0)(1 - u_i^0)\} \quad (16)$$

Persamaan (4) – (8) dapat secara langsung digunakan untuk menyelesaikan (2) dengan metode MIQP.

IV. METODOLOGI

Model formulasi MIQP yang diusulkan diuji menggunakan perangkat lunak komersial TOMLAB/CPLEXv.10.0. Sistem yang menjadi objek penelitian adalah 10 unit pembangkit termal, sel surya dan baterai dimana parameter dan data beban sistem mengacu pada [9] dengan pengecualian data tenaga angin. Tiga skenario yang digunakan pada penelitian ini adalah penjadwalan pembangkit termal, penjadwalan pembangkit termal dan sel surya, dan penjadwalan pembangkit termal, sel surya dan baterai. Besarnya cadangan berputar ditentukan oleh variabilitas beban dan variabilitas pembangkit terbarukan. Pada skenario pertama, ditambahkan empat tingkatan variabilitas beban yaitu 0%, 5%, 10% dan 15%. Sedangkan pada skenario kedua dan ketiga ditambahkan variabilitas energi terbarukan dengan lima tingkatan, yaitu 0%, 20%, 40%, 60% dan 80%.

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

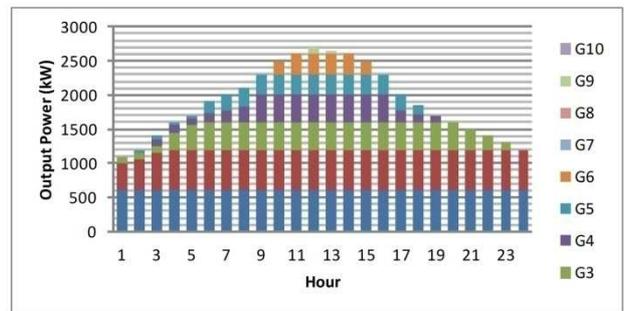
Parameter dari pembangkit termal dan data beban yang ada pada [9] disimulasikan menggunakan perangkat lunak TOMLAB/CPLEX v10.0 tanpa melibatkan pembangkit tenaga angin.

Pada skenario pertama yang hanya melibatkan pembangkit termal dengan empat tingkatan variabilitas beban menghasilkan biaya total yang berbeda-beda seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

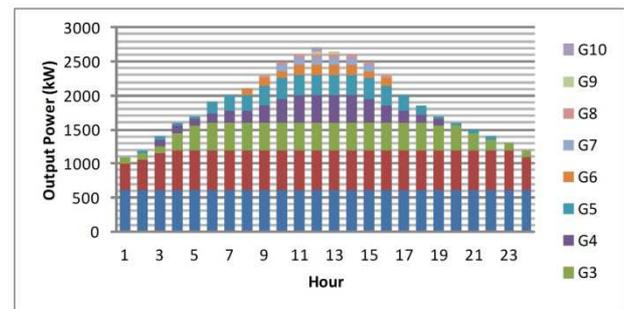
TABEL I
BIAYA TOTAL OPERASI UNTUK SKENARIO PERTAMA

Cost	Variabilitas beban			
	R 0%	R 5%	R 10%	R 15%
Fuel Cost (\$)	343,825	344,780	345,648	347,434
Start Cost (\$)	3,880	5,320	5,600	7,860
Total Cost (\$)	347,705	350,100	351,248	355,294

Pada skenario pertama, variabilitas beban mempengaruhi jumlah unit yang berkomitmen. Gbr. 1 dan Gbr. 2 menunjukkan pengaruh dari variabilitas beban yang memperbanyak jumlah unit yang berkomitmen dan menghasilkan biaya yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan kebutuhan terhadap kenaikan jumlah cadangan berputar yang dengan sendirinya meningkatkan biaya.

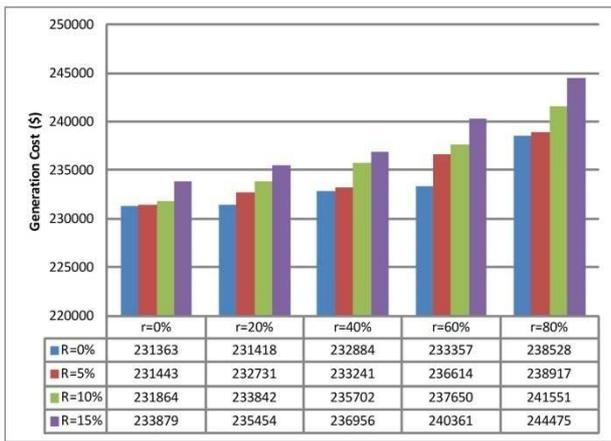


Gbr. 1 Dispatch daya untuk unit termal pada skenario pertama dengan variabilitas beban 0%



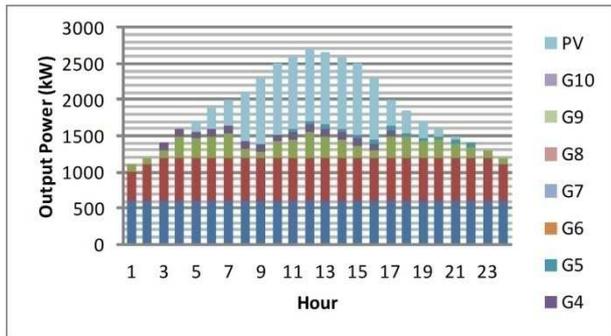
Gbr. 2 Dispatch daya untuk unit termal pada skenario pertama dengan variabilitas beban 15%

Dilibatkannya sel surya ke dalam sistem disimulasikan pada skenario kedua. Gbr. 3 menunjukkan pengaruh yang signifikan dari masuknya sel surya terhadap biaya total operasi.

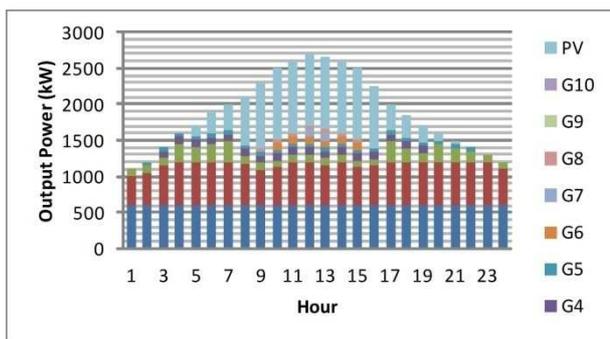


Gbr. 3 Biaya total operasi untuk skenario kedua

Biaya total operasi berkurang ketika sel surya dilibatkan dalam proses penjadwalan. Pada skenario kedua, biaya total operasi berada dalam rentang \$231,363 hingga \$244,475. Jika dibandingkan dengan hasil pada skenario 1 seperti yang tercantum dalam Tabel. 1, penambahan sel surya menghemat total biaya sebesar ± \$100,000. Hal ini dikarenakan sumber energi sel surya tidak memerlukan biaya.



Gbr 4 Dispatch daya untuk pada skenario kedua dengan variabilitas beban 15% dan variabilitas energi terbarukan 10%

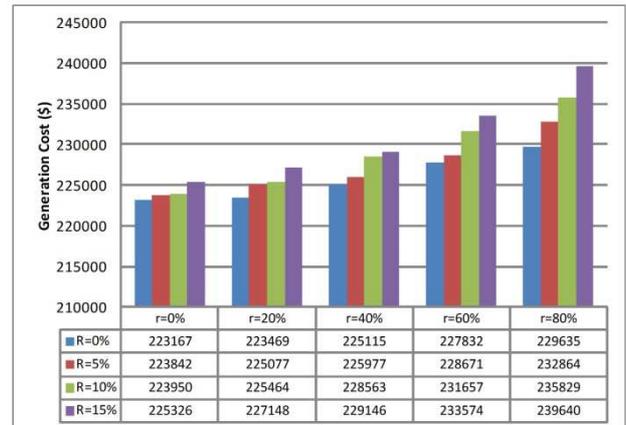


Gbr. 5. Dispatch daya untuk pada skenario kedua dengan variabilitas beban 15% dan variabilitas energi terbarukan 10%

Pengaruh dari variabilitas pembangkitan oleh sel surya ditunjukkan pada Gbr.4 dan Gbr. 5. Peningkatan variabilitas pembangkitan oleh sel surya harus dikompensasi dengan penambahan cadangan berputar yang juga menyebabkan meningkatnya biaya *start up* dan biaya bahan bakar.

Penambahan ini berakibat pada peningkatan biaya total operasi.

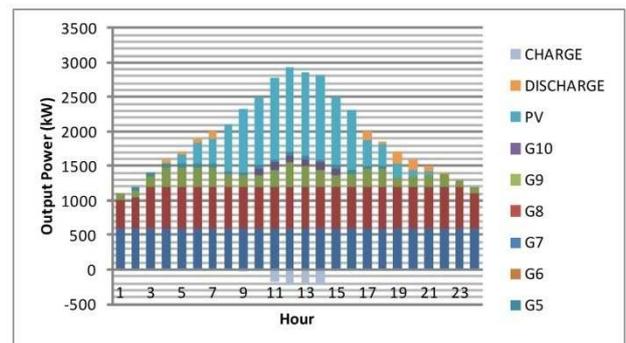
Biaya total operasi akan kembali berubah ketika unit baterai dilibatkan dalam penjadwalan seperti yang ada pada Gbr.6.



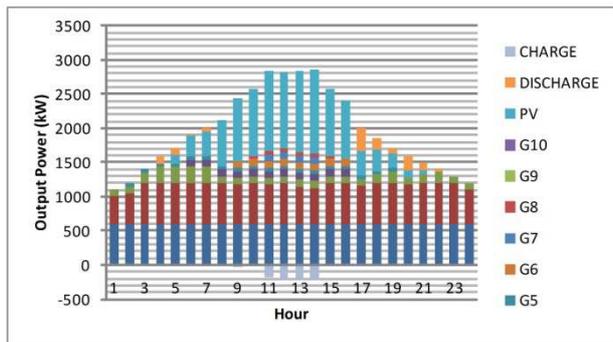
Gbr 6 Biaya total operasi untuk skenario ketiga

Unit baterai mengurangi jumlah unit termal yang beroperasi dan berimplikasi pada penurunan biaya total operasi. Pada skenario ini, biaya total yang didapatkan berada pada rentang \$223,167 hingga \$239,640 yang berarti berkurang sekitar ± \$10,000 jika dibandingkan dengan skenario kedua.

Baterai adalah unit yang tidak dapat di-*dispatch*. Aliran daya untuk baterai bernilai positif ketika baterai melakukan pengosongan untuk menyuplai daya ke sistem. Sebaliknya, aliran daya bernilai negatif ketika baterai melakukan pengisian dengan meminta daya dari sistem. Dalam studi ini baterai melakukan pengisian menggunakan daya yang berlebihan dari sistem ketika beban dalam keadaan rendah. Gbr. 7 dan Gbr. 8 menunjukkan unit yang berkomitmen dan *dispatch* daya pada berbagai tingkatan variabilitas energi terbarukan.



Gbr 7 Dispatch daya untuk pada skenario ketiga dengan variabilitas beban 15% dan variabilitas energi terbarukan 10%



Gbr 8. Dispatch daya untuk pada skenario ketiga dengan variabilitas beban 15% dan variabilitas energi terbarukan 80%

Pengaruh penambahan tingkatan variabilitas energi terbarukan sama seperti pada skenario kedua, yaitu meningkatkan cadangan berputar sehingga menambah jumlah unit yang beroperasi yang menyebabkan kenaikan biaya *start-up* dan biaya bahan bakar.

VI. KESIMPULAN

Pada paper ini, sistem tenaga yang merupakan kombinasi antara unit termal, sel surya dan baterai disimulasikan menggunakan tiga skenario. Unit komitmen diselesaikan menggunakan MIQP dengan perangkat lunak CPLEX.

Variabilitas beban mempengaruhi jumlah unit yang berkomitmen. Variabilitas beban meningkatkan jumlah unit yang berkomitmen dan menghasilkan biaya yang lebih besar. Hal ini dikarenakan kebutuhan akan kenaikan cadangan berputar yang dengan sendirinya meningkatkan biaya.

Pelibatan sel surya dan baterai dalam unit komitmen mengurangi biaya total operasi. Hal ini dikarenakan energi yang digunakan oleh sel surya tidak membutuhkan biaya.

Kenaikan variabilitas energi terbarukan harus dikompensasi dengan penambahan cadangan berputar.

REFERENSI

- [1] Y. Ikeda, T. Ikegami, K. Kataoka, K. Ogimoto, "A Unit Commitment Model with Demand Response for the Integration of Renewable Energies" IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2012.
- [2] D. E. Newman, B. A. Carreras, M. Kirchner, I. Dobson, "The Impact of Distributed Generation on Power Transmission Grid Dynamics," *hicc*s, pp.1-8, 2011 44th Hawaii International Conference on System Sciences, 2011
- [3] T. Longentiran, D. Srinivasan, "Short Term Generation Scheduling of a Microgrid," TENCON – IEEE Region 10 Conference, 2009
- [4] S. Salam, "Unit Commitment Solution Methods," World Academy of Science, Engineering and Technology 35, 2007
- [5] Contaxis G.C. Kabouris J., "Short Term Scheduling in a wind/Diesel Autonomous Energy System," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 1161-1167, 1991.
- [6] B. Lu, M. Shahidehpour, "Short-Term Scheduling of Battery in a Grid-Connected PV/Battery System," IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 20, No. 2, pp. 1053-1061, 2005.
- [7] Bakirtzis A.G., Dokopoulos P.S., "Short Term Generation Scheduling in a Small Autonomous System with Unconventional Energy Sources," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 3, pp.1230-1236, 1988.
- [8] Hong Ying-Yi, Chiu Ching-Sheng, Li Chang-Ting., "KW Scheduling in an Autonomous System," Power Tech IEEE Lausanne Conference Paper, page(s): 1730 -1735, 2007
- [9] Ahn Seon-Ju, Moon Seung-Il, "Economic Scheduling of Distributed Generators in a Microgrid Considering Various Constraints," Power & Energy Society General Meeting, PES '09. IEEE, 2009
- [10] Khodr, H.M.; Vale, Zita A.; Ramos, Carlos; Soares, J.P.; Morais, H.; Kadar, Peter. "Optimal Methodology for Renewable Energy Dispatching in Islanded Operation," Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES, page(s): 1 – 7, 2010.
- [11] M. Carrion, J. M. Arroyo, "A Computationally Efficient Mixed-Integer Linear Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem", IEEE Trans. on Power System, vol. 21, no.3, pp 1371-1378, 2006
- [12] F. Budiman, "Penjadwalan Unit Pembangkit Termal dengan Memperhitungkan Kekangan Emisi Lingkungan dan Ketidakpastian Sistem," unpublished