

PENGOPTIMALAN OPERASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HIBRIDA SURYA - ANGIN UNTUK MENGURANGI EXCESS ELECTRICITY MENGGUNAKAN MIX INTEGER LINEAR PROGRAMMING

Winasis^{*)}, Imron Rosyadi, and Sarjiya

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Jenderal Soedirman
Jl. Mayjen Sungkono km.5 Blater Purbalingga Jawa Tengah

^{*)}E-mail: waseis@yahoo.com

Abstrak

Salah satu upaya yang dilakukan dalam pemenuhan kebutuhan energi listrik adalah dengan memanfaatkan sumber energi baru dan terbarukan (EBT) seperti : energi matahari dan energi angin sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTH). Penelitian ini bertujuan menganalisis pengoptimalan pengoperasian sistem PLTH Surya Angin dengan studi kasus pada PLTH Pantai Baru Bantul menggunakan metode *Mix Integer Linear Programming*. pengoptimalan bertujuan untuk meminimalkan *excess electricity* dan memaksimalkan pemanfaatan potensi energi terbarukan dengan memperhatikan batasan-batasan yang terkait dengan kapasitas modul sel surya, kapasitas turbin angin, kapasitas inverter, dan kendala baterai. Permasalahan optimisasi dan batasan operasi diformulasikan sebagai model *Mix Integer Linear Programming* (MILP) dan diselesaikan menggunakan software optimisasi Tomlab CPLEX. Simulasi model optimisasi menggunakan data pembangkit listrik hibrida surya angin Pantai Baru dilakukan dengan skenario penambahan beban *non-critical (dummy)* pada sistem pembangkit hibrida. Berdasarkan hasil simulasi didapatkan nilai *excess electricity* dapat dikurangi dan pemanfaatan energi pada beban dapat dimaksimalkan.

Kata kunci: excess electricity, MILP, pembangkit listrik tenaga hibrida, pengoptimalan

Abstract

One of the efforts made to meet the needs of the electrical energy is utilizing new and renewable energy sources such as solar energy and wind energy as a Hybrid Power Plant. This study aims to analyze the optimization of Solar Wind Hybrid Power Plant operation with a case study on Hybrid Power Plant Pantai Baru Bantul using the Mix Integer Linear Programming. Optimization aims to minimize *excess electricity* and maximize the utilization of renewable energy potential with the limitations associated with the capacity of solar cell modules, wind turbine capacity, the capacity of the inverter, and battery constraints. Optimization problems and operation constraints are formulated as a Mix Integer Linear Programming (MILP) model and solved using Tomlab CPLEX optimization software. Simulation of optimization model is done using specification and operation data of Pantai Baru Solar-Wind Hybrid Power Plant with a scenario of non-critical loads (dummy) addition in the hybrid generation system. Based on the simulation results obtained value of *excess electricity* can be reduced and the use of energy in the load can be maximized.

Keywords: excess electricity, MILP, hybrid power plant, optimization.

1. Pendahuluan

Energi listrik saat ini telah menjadi kebutuhan primer bagi kehidupan masyarakat. Ketersediaan energi menjadi salah satu kebutuhan dasar manusia. Ketersediaan energi tersebut mempengaruhi cara manusia mengolah bahan dan hasil pertanian, memasak, menerangi ruangan, menyediakan fasilitas pendidikan, fasilitas kesehatan, fasilitas usaha, fasilitas komunikasi, fasilitas hiburan

dan lainnya. Ketersediaan energi listrik di suatu daerah juga sangat menunjang tingkat pertumbuhan ekonomi pada suatu daerah. Pada berbagai kasus penerapan pembangkit listrik termasuk di daerah terpencil, berdampak pada kehidupan sosial dan ekonomi yang berkembang cukup pesat.

Salah satu upaya pemenuhan kebutuhan energi listrik adalah dengan memanfaatkan sumber energi baru dan

terbarukan (EBT) seperti : energi matahari dan energi angin. Pemanfaatan energi terbarukan sebagai sumber energi pembangkit listrik memiliki beberapa keunggulan, seperti energi yang ramah lingkungan dan didapatkan secara gratis dan sesuai untuk penyediaan energi listrik bagi daerah terpencil yang sulit terjangkau jaringan grid listrik.

Pada sisi lain, sumber energi terbarukan seperti matahari dan angin yang berubah-ubah secara acak menjadikan pembangkit energi terbarukan secara individu kurang handal. Akan tetapi pada beberapa daerah, ketika energi matahari dan angin digabungkan, mereka saling melengkapi satu sama lain dengan rata-rata variasi harian dan musiman yang dimiliki. Penggabungan dua jenis sumber energi terbarukan ini dapat membuat sistem menjadi lebih handal dan biaya sistem dapat diturunkan. Akan tetapi, prosedur penentuan ukuran (sizing) dan strategi kontrol operasi sistem energi hibrida ini menjadi lebih kompleks akibat karakteristik fisik komponen yang non linear [1].

Kombinasi dari sumber-sumber energi terbarukan diharapkan dapat menyediakan catu daya listrik yang kontinyu dengan efisiensi yang optimal [2]. Keuntungan lain sistem pembangkit hibrida adalah *life cycle (life cycle unit cost)* yang lebih rendah dibandingkan sistem pembangkit surya dan angin yang terpasang terpisah. PLTH Pantai Baru merupakan salah satu PLTH yang memanfaatkan energi matahari dan energi angin, dibangun sejak Tahun 2010 di Pantai Baru, berada di Dusun Ngentak, Srandakan, Bantul, Yogyakarta. Pembangunan PLTH ini tidak terlepas dari potensi strategis energi surya dan angin yang terdapat di daerah tersebut. PLTH Pantai Baru meliputi 35 unit turbin angin dengan kapasitas total 121 kW dan 175 unit sel surya dengan kapasitas total 17,5 kWp.

Energi yang dihasilkan dari PLTH dimanfaatkan untuk menyuplai kebutuhan listrik rumah dan warung di lokasi wisata Pantai Baru, penerangan jalan, pompa air, dan memproduksi balok es yang digunakan untuk pengembangan ekonomi masyarakat nelayan dan petani disekitarnya. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Purnamasari [3] pembangunan pembangkit listrik tenaga angin dan tenaga surya Pantai Baru sangat banyak dirasakan manfaatnya bagi pedagang dan pemilik warung kuliner di lokasi Pantai Baru Bantul. Keberadaan PLTH ini selain menunjang pemenuhan kebutuhan energi listrik di lokasi setempat juga mampu mengembangkan memajukan perekonomian desa dan kehidupan sosial masyarakat.

Untuk mengetahui unjuk kerja dari PLTH Surya Angin yang telah terpasang di Pantai Baru beberapa penelitian telah dilakukan antara lain terkait analisis kontribusi kincir angin [4] dan analisis kontribusi panel surya [5] pada Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Pantai Baru

Ngentak. Penelitian lain [6] menunjukkan unjuk kerja salah satu sub bagian PLTH Pantai Baru dengan nilai *performance ratio* yang rendah dan *excess electricity* tinggi akibat nilai beban yang rendah dan sistem tidak beroperasi optimal.

Beberapa penelitian telah membahas metode pengoptimalan pada pembangkit listrik energi terbarukan antara lain : Algoritma Genetik (GA) [7], [8], hibrid LR dan GA [9], MIQP [10]. Pada penelitian ini dilakukan simulasi pengoptimalan pengoperasian sistem PLTH Surya Angin menggunakan metode optimasi berbasis *Mix Integer Linear Programming*. Metode *mix-integer linear programming* (MILP) dapat menyelesaikan permasalahan pengoptimalan yang melibatkan fungsi objektif dan konstrain berupa persamaan linear. Metode ini banyak diminati oleh karena perbaikan yang cukup drastis dalam waktu penyelesaian dengan adanya solver MIP. Beberapa konstrain seperti status unit pembangkit dan status pengisian baterai dapat dinyatakan dalam bilangan integer biner, sehingga sangat cocok dituliskan dalam model *mix integer*. Aplikasi MILP pada penyelesaian penjadwalan sistem pembangkit energi terbarukan diantaranya disajikan dalam [11] pada sistem yang terdiri dari: modul PV, wind park, baterai dan fuel cell dan [12] pada sistem PV - Wind - Diesel - Baterai.

Pengoptimalan secara umum bertujuan untuk memenuhi kebutuhan beban, memaksimalkan utilisasi potensi energi terbarukan dan meminimalkan *excess electricity* Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida.

2. Metode

2.1. Formulasi Optimisasi Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Surya Angin

Perumusan pengoptimalan operasi pada penelitian ini ditujukan meminimalkan *excess electricity* pada PLTH dengan mengasumsikan pada bus beban ditambahkan beban tambahan yang sifatnya *non critical* (P_{dummy}), dan dioperasikan untuk memaksimalkan pemanfaatan energi dari pembangkit. Secara matematis fungsi objektif optimisasi dirumuskan sebagai berikut.

$$\min \sum_{t=1}^T E_E(t) = \min \sum_{t=1}^T P_{excess}(t) \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$P_{excess}(t) = P_{Smax}(t) + P_{Wmax}(t) - P_S(t) + P_W(t) \quad (2)$$

dengan $E_E(t)$ adalah energi terbuang sebagai *excess electricity* pada waktu t dalam kWh, $P_{excess}(t)$ adalah daya listrik terbuang pada waktu t dan T adalah periode pengoptimalan.

Besarnya *excess electricity* pada waktu t didapatkan dari perhitungan daya potensial yang dapat dihasilkan oleh PV (P_{Smax}) dan turbin angin (P_{Wmax}) mengacu pada intensitas radiasi dan kecepatan angin dikurangi daya real yang

dihasilkan PV (P_s) dan turbin angin (P_w) pada waktu tertentu.

Pengoptimalan operasi PLTH ini dilakukan dengan memperhatikan beberapa asumsi sebagai berikut :

1. Rugi - rugi saluran diabaikan
2. Pengoptimalan operasi dilakukan dalam jangka menengah menggunakan data intensitas radiasi matahari dan kecepatan angin berdasarkan data NASA *Surface meteorology and Solar Energy*.
3. Pola beban diklasifikasikan menjadi beban *weekday* dan *weekend*.

2.2. Kendala Operasi

Penyelesaian permasalahan optimasi operasi sistem PLTH mengacu pada kendala (*constraint*) operasi meliputi :

1. Persamaan daya pembangkitan dan beban.

Energi yang disuplai pembangkit harus mencukupi kebutuhan beban, sehingga dalam hal ini daya pembangkitan pada suatu saat adalah sama dengan daya beban sebagaimana disajikan pada persamaan 3 :

$$P_{S(t)} + P_{W(t)} + P_{BD(t)} = P_{BC(t)} + P_{DC(t)} \quad (3)$$

dengan :

- $P_{S(t)}$ = Daya PV pada waktu ke t (kW)
- $P_{W(t)}$ = Daya generator turbin angin (kW)
- $P_{BD(t)}$ = Daya pengosongan (discharge) baterai (kW)
- $P_{BC(t)}$ = Daya pengisian (charge) baterai (kW)
- $P_{DC(t)}$ = Daya masuk ke inverter beban (kW)

Daya yang mengalir ke beban adalah sama dengan daya masukan inverter dikalikan efisiensi inverter, maka daya masuk inverter dapat dinyatakan sebagai :

$$P_{DC(t)} = \frac{P_{L(t)}}{\eta_{inv}} \quad (4)$$

dengan $P_{L(t)}$ adalah daya beban pada waktu t dan η_{inv} adalah efisiensi inverter. Sehingga persamaan kesetimbangan daya di atas dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P_{PV(t)} + P_{W(t)} + P_{BD(t)} = P_{BC(t)} + \frac{P_{L(t)}}{\eta_{inv}} \quad (5)$$

Pada simulasi dengan penambahan beban *dummy* (P_{nc}) maka persamaan diatas menjadi :

$$P_{PV(t)} + P_{W(t)} + P_{BD(t)} = P_{BC(t)} + \frac{P_{L(t)}}{\eta_{inv}} + \frac{P_{nc(t)}}{\eta_{inv}} \quad (6)$$

- $P_{L(t)}$ = daya beban utama PLTH (kW)
- $P_{nc(t)}$ = daya beban *dummy* (kW)

2. Batasan daya pembangkitan subsistem PV

Solar PV mengubah energi matahari menjadi energi listrik dengan nilai maksimum daya pembangkitan solar PV sebanding dengan radiasi matahari dan kapasitas sistem PV. Besar daya output yang dapat dibangkitkan oleh sel surya secara teoritis dapat dihitung secara matematis dengan persamaan berikut [13]:

$$P_{PV} = \frac{G}{1000} \times P_{PV, rated} \times \eta_{PV, conv} \quad (7)$$

dengan :

- P_{PV} = daya output modul sel surya pada iradiansi G_{INC} (kW)
- $P_{PV, rated}$ = daya maksimum modul sel surya pada kondisi standar (STC) (kW)
- G = radiasi matahari para permukaan *array* (W/m^2)
- $\eta_{PV, conv}$ = efisiensi konverter PV

Oleh karena itu daya dan energi listrik yang dapat dibangkitkan *array* PV pada waktu t dibatasi oleh kapasitas daya PV yang terpasang dan radiasi matahari pada waktu itu. Secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$P_{S(t)} \leq P_{PV(t)} \quad (8)$$

dengan :

- $P_{s(t)}$ = daya listrik real yang dihasilkan *array* PV pada waktu t (kW)
- $P_{PV(t)}$ = daya teoritis PV pada waktu t (kW)

3. Batasan daya pembangkitan *Wind Turbine Generator* (WTG)

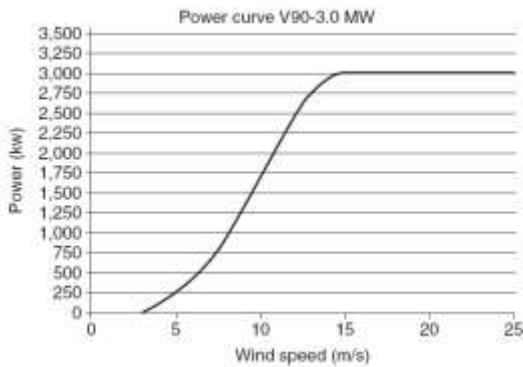
Masukan WTG adalah energi angin. Daya keluaran turbin angin merupakan fungsi kecepatan angin dapat dinyatakan dalam persamaan berikut [13] :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (9)$$

dengan :

- P_m = daya output mekanik turbin (kW)
- C_p = koefisien unjuk kerja turbin
- ρ = kepadatan udara (kg/m^3)
- A = luas penampang turbin (m^2)
- v = kecepatan angin (m/s)

WTG akan menghasilkan daya listrik (P_w) berdasarkan kurva daya versus kecepatan WTG.



Gambar 1. Tipikal kurva output turbin angin [7]

Daya dan energy maksimum yang dapat dibangkitkan WTG dibatasi oleh rating daya turbin angin yang terpasang dan kecepatan angin yang mengenai turbin pada waktu tersebut. Hubungan daya maksimal WTG dan kecepatan angin dimodelkan pada persamaan 10.

$$P_{W(t)} \leq P_{Wmax(t)} \quad (10)$$

$$P_{W,max(t)} = \begin{cases} 0 & 0 < v(t) < v_{ci} \\ a + b \cdot v(t) + c \cdot v_t^2 & v_{ci} < v(t) < v_r \\ P_{Wr} & v_r < v(t) < v_{co} \\ 0 & v(t) > v_{co} \end{cases} \quad (11)$$

$P_{W,max(t)}$ = daya maksimum turbin angin pada waktu t (kW)

$v(t)$ = kecepatan angin pada waktu t (m/s)

a, b, c = koefisien kurva daya turbin angin

P_{Wr} = rating daya turbin angin (kW)

v_{ci} = kecepatan cut in turbin angin (m/s)

v_r = kecepatan rating turbin angin (m/s)

v_{co} = kecepatan cut off turbin angin (m/s)

4. Batasan operasi baterai.

Baterai dalam sistem PLTH beroperasi di bawah kondisi tertentu yang diizinkan. Parameter yang menjadi batasan kinerja baterai diantaranya : kapasitas baterai, *deep of discharge* (DOD), status pengisian (*state of charge*), efisiensi baterai, batas laju pengisian dan pengosongan baterai.

$$P_{BC(t)} \leq P_{BC,max} \cdot X(t) \quad (12)$$

$$P_{BD(t)} \leq P_{BD,max} \cdot Y(t) \quad (13)$$

$$X(t) + Y(t) \leq 1, X \text{ dan } Y \in \{0,1\} \quad (14)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (15)$$

$$SOC(t) = SOC_{(t-1)} + \eta_{ch} \cdot P_{BC(t)} - \frac{P_{BD(t)}}{\eta_d} \quad (16)$$

dengan

$P_{BC(t)}$ = daya pengisian baterai pada waktu t (kW)

$P_{BD(t)}$ = daya pengosongan baterai pada waktu t(kW)

$P_{BC,max}$ = daya pengisian maksimal baterai (kW)

$P_{BD,max}$ = daya pengosongan maksimal baterai (kW)

$X(t)$ = status pengisian baterai

$Y(t)$ = status pengosongan baterai

$SOC(t)$ = kondisi pengisian (*state of charge*) baterai pada waktu t(kWh)

SOC_{min} = batas pengisian minimal baterai (kWh)

SOC_{max} = batas pengisian maksimal baterai (kWh)

η_c = efisiensi pengisian baterai

η_d = efisiensi pengosongan baterai

5. Batasan operasi konverter.

Batasan operasi terkait konverter meliputi : kapasitas dan efisiensi konverter. Aliran daya pada inverter pada waktu t ($P_{inv(t)}$) dibatasi tidak boleh melebihi pada kapasitas atau rating daya dari inverter (P_{rating_inv})

$$P_{inv(t)} \leq P_{rating_inv} \quad (17)$$

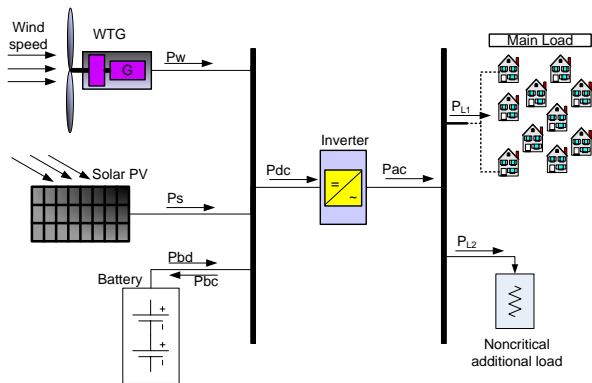
3. Hasil dan Analisa

Permasalahan pengoptimalan pembangkit listrik tenaga hibrida sebagaimana diformulasikan diatas memiliki fungsi tujuan dan batasan yang merupakan fungsi linear, dengan variabel persamaan berupa gabungan (mixed) antara variabel bilangan nyata dan integer. Teknik optimisasi Mix Integer Linear Programming (MILP) dipilih untuk menyelesaikan permasalahan optimasi tersebut.

Formulasi permasalahan optimisasi berupa fungsi objektif dan konstrain kemudian disusun dalam sebuah program pengoptimalan PLTH. Rumusan fungsi tujuan dan kendala operasi di atas diterapkan pada kasus Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTH) Surya-Angin Pantai Baru Grup KKP dan diselesaikan solusinya menggunakan perangkat lunak optimisasi Tomlab CPLEX

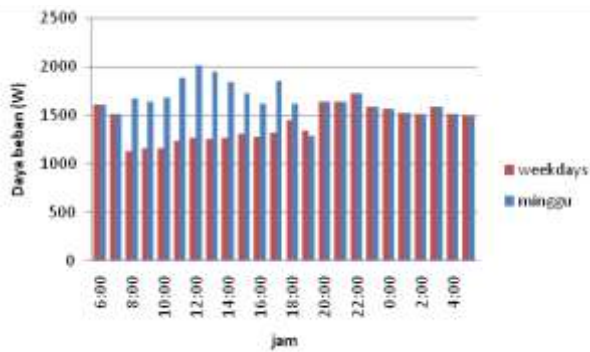
Gambar 2. menunjukkan model PLTH Surya – Angin sebagai representasi PLTH Surya – Angin Pantai Baru Grup KKP. Komponen PLTH meliputi :

- 1) Generator turbin angin (Wind Turbin Generator / WTG) dengan kapasitas 3 x 400 W
- 2) Solar PV sebagai pembangkit energi listrik dengan kapasitas 12 kWp
- 3) Baterai sebagai penyimpan energi listrik dengan kapasitas penyimpanan 144 kWh
- 4) Inverter untuk mengubah tegangan DC menjadi AC dengan kapasitas 3 x 3.5 kVA
- 5) Beban : meliputi beban utama dengan pola beban sesuai dengan model beban dan beban tambahan untuk mengurangi excess energy.
- 6) Bus DC dan bus AC



Gambar 2. Diagram Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Surya Angin

Beban PLTH Pantai Baru grup KKP pada dasarnya berubah-ubah tergantung kebutuhan konsumen. Pola beban berdasarkan data monitoring beban dikelompokkan dalam 2 pola : (1) pola beban hari senin – Sabtu (*weekdays*) dan (2) pola beban hari minggu (*weekend*).



Gambar 3. Model pola beban PLTH Pantai Baru grup KKP

Gambar 3 menunjukkan pola beban PLTH Pantai Baru grup KKP dimana beban pada hari minggu secara umum lebih tinggi dibanding pada hari lainnya, sementara beban pada waktu malam hari cenderung datar.

3.1. Simulasi Pengoptimalan PLTH

Permasalahan pengoptimalan pembangkit listrik tenaga hibrida sebagaimana diformulasikan diatas memiliki fungsi tujuan dan batasan yang merupakan fungsi linear, dengan variabel persamaan berupa gabungan (*mixed*) antara variabel bilangan nyata dan integer. Teknik optimisasi *Mix Integer Linear Programming* (MILP) dapat dipilih untuk menyelesaikan permasalahan penjadwalan optimal tersebut.

Formulasi permasalahan optimisasi berupa fungsi objektif dan konstrain kemudian disusun dalam sebuah program pengoptimalan PLTH dan diimplementasikan pada system PLTH Surya Angin Pantai Baru grup KKP. Formulasi optimisasi dalam *Mix Integer Linear Programming* kemudian diselesaikan solusinya

menggunakan perangkat lunak optimisasi Tomlab CPLEX.

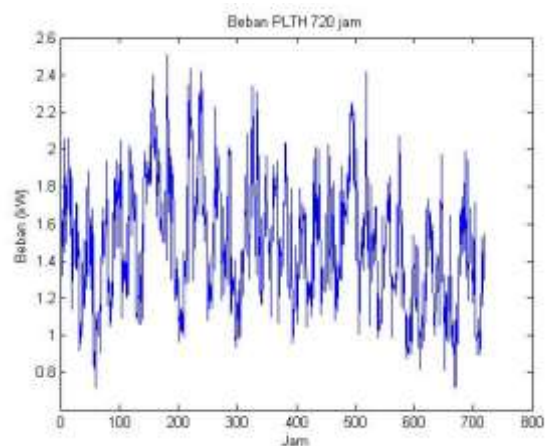
3.2. Input Simulasi

Inputan data simulasi meliputi spesifikasi PLTH, profil beban, radiasi matahari dan kecepatan angin. Data mengacu pada spesifikasi dan profil beban PLTH Pantai Baru grup KKP serta radiasi matahari dan kecepatan angin pada lokasi PLTH. Spesifikasi PLTH secara ringkas adalah sebagai berikut :

- Kapasitas PV = 12 kWp
- Kapasitas WTG = 3x0.4 kW
- Kapasitas Baterai = 144 kWh
- Kapasitas Inverter= 3 x 3,5 kVA

Modul PV diasumsikan menggunakan konverter dengan efisiensi 90% [14]. Kemudian laju pengisian (Pbc) dan pengosongan (Pbd) baterai dibatasi maksimal 12 kWh tiap jamnya. Tingkat kedalaman *discharge* (*deep of discharge* / DOD) yang diperkenankan adalah sebesar 80% [15] atau baterai dapat dikosongkan hingga kondisi pengisian (SOC) mencapai 20% [15] dari kapasitasnya. Nilai efisiensi pengisian / pengosongan baterai diasumsikan sebesar 85% [15]. Nilai efisiensi inverter diasumsikan sebesar 95% [16], [17].

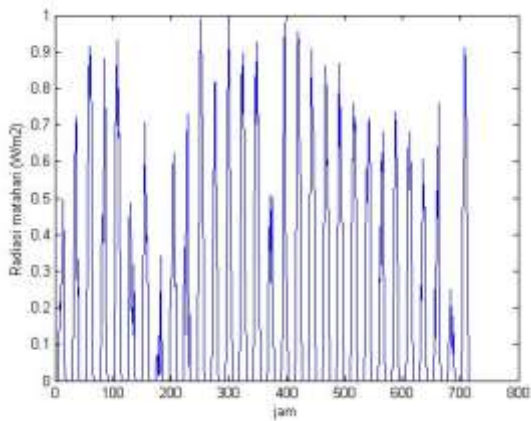
Masukan data beban yang digunakan pada simulasi adalah selama 1 bulan (720 jam) dengan beban dimodelkan ke dalam beban weekday dan hari minggu. Variabilitas acak (*random variability*) beban dari jam ke jam dan dari hari ke hari sebesar 10%. Gambar 4 menunjukkan masukan data beban 720 jam simulasi setelah memasukkan variabilitas beban.



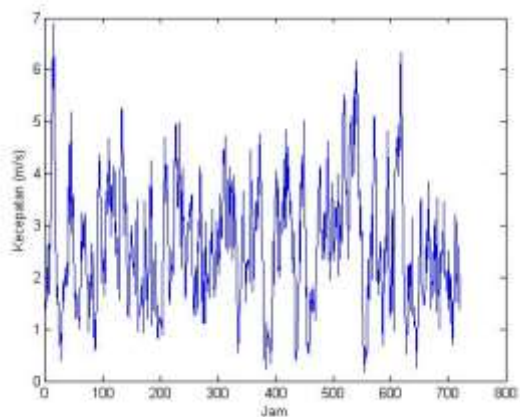
Gambar 4. Masukan data beban PLTH

Resource radiasi matahari dan kecepatan angin pada simulasi ini menggunakan data NASA Surface Meteorology and Solar Energy (NASA SSE) dengan memasukkan kordinat lokasi PLTH. Gambar 5 menunjukkan data resource radiasi matahari selama 720

jam yang digunakan pada simulasi, dengan radiasi rata-rata sebesar $4,72 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$. Resource kecepatan angin selama 720 jam yang digunakan pada simulasi diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Masukan data radiasi matahari 720 jam

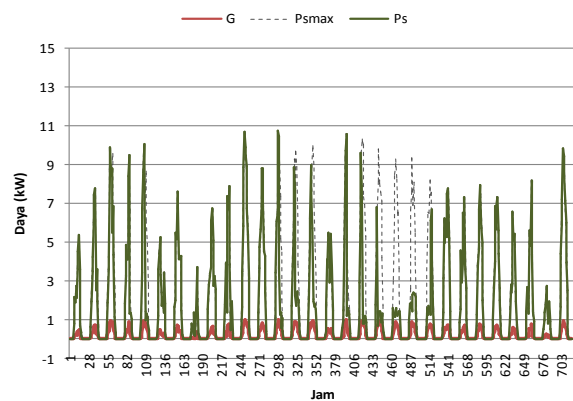


Gambar 6. Masukan data kecepatan angin 720 jam

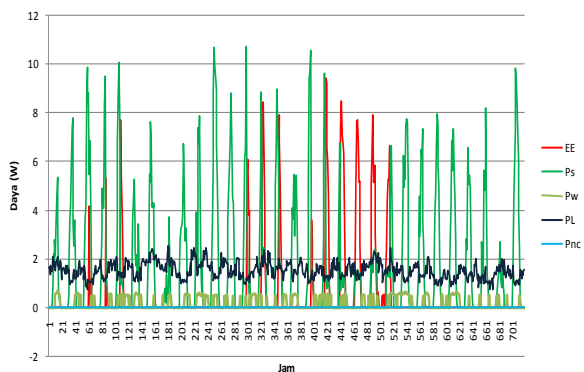
3.3. Simulasi Kondisi PLTH Eksisting

Hasil simulasi operasi PLTH dengan menggunakan spesifikasi PLTH, data beban dan radiasi matahari dan kecepatan angin di lokasi PLTH diperlihatkan pada Gambar 7 sampai dengan Gambar 10 berikut. Gambar 7 menunjukkan perbandingan daya real yang dihasilkan oleh array PV dan potensi daya maksimal yang dapat dibangkitkan. Terlihat bahwa pada beberapa titik tertentu, daya yang dihasilkan sistem PV adalah lebih rendah dari nilai maksimalnya. Dari total potensi energi dalam 720 jam sistem PV (P_{smax}) sebesar 1528 kWh, produksi energi dari sistem PV hanya sebesar 1203 kWh.

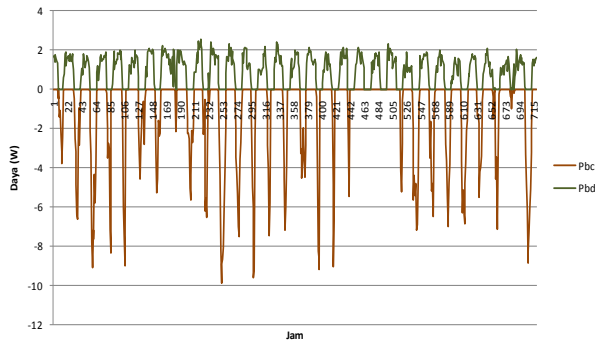
Terdapat *excess electricity* yang cukup besar akibat selisih energi produksi dibandingkan potensi yang ada sebesar 325 kWh sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 8. Energi yang dihasilkan oleh array PV utamanya digunakan untuk menyuplai kebutuhan beban. Sedangkan kelebihannya akan diisikan atau disimpan pada baterai. Energi tersimpan ini akan dikeluarkan (*discharge*) manakala energi dari array PV atau WTG lebih rendah dari kebutuhan beban. Gambar 9 memperlihatkan siklus pengisian dan pengosongan baterai selama 720 jam. Total energi pengisian baterai adalah 805 kWh, sedangkan energi pengosongan sebesar 616 kWh. Terdapat selisih 189 kWh yang merupakan rugi - rugi baterai. Status pengisian (SOC) baterai diperlihatkan pada Gambar 10. Pada kondisi beban rendah dan baterai telah terisi penuh (SOC = 100%) maka kelebihan potensi energi dari array PV atau WTG tidak lagi digunakan untuk mengisi baterai. Sehingga array PV dan WTG hanya menghasilkan daya listrik sesuai dengan kebutuhan beban, lebih rendah dari nilai potensi daya maksimalnya.



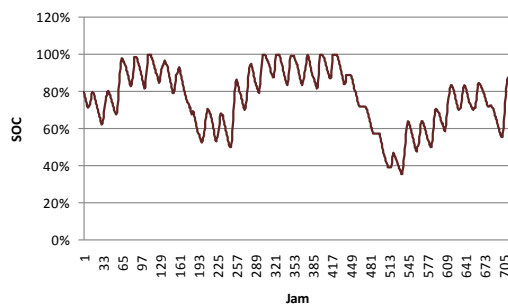
Gambar 7. Hasil simulasi perbandingan daya pembangkitan PV dan daya maskimum PV



Gambar 8. Hasil simulasi daya sistem dan *excess electricity*



Gambar 9. Hasil simulasi daya pengisian dan pengosongan baterai



Gambar 10. Hasil simulasi status pengisian baterai

Ringkasan hasil simulasi operasi PLTH selama 720 jam disajikan pada tabel 2. Total energi kebutuhan beban adalah sebesar 1071.064 kWh. Sedangkan energi yang dihasilkan *array* PV dan WTG masing-masing sebesar 1203.246 kWh dan 113.5736 kWh sehingga total energi yang dibangkitkan adalah sebesar 1316 kWh. Terdapat 245.7566 kWh (19%) yang hilang di sistem akibat rugi-rugi pada baterai dan inverter. Besarnya *excess electricity* pada kasus ini adalah 340.5035 kWh.

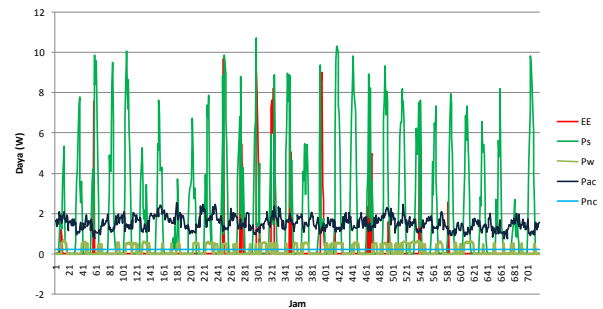
Tabel 1. Ringkasan hasil simulasi operasi 720 jam PLTH Grup KKP Eksisting

Energi Sistem	Nilai	Satuan
Produksi PV	: 1203.246	kWh
Produksi WTG	: 113.5736	kWh
Energi Beban	: 1071.064	kWh
Losses	: 245.7556	kWh
<i>Excess electricity</i>	: 340.5035	kWh

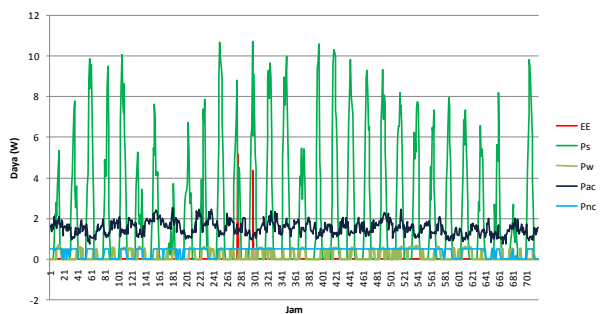
3.4. Simulasi Pengoptimalan dengan Penambahan Beban *Dummy*

Untuk meminimalkan *excess electricity* dan memaksimalkan produksi energi PLTH, maka disimulasikan pengoptimalan operasi PLTH dengan menambahkan beban tambahan *dummy*. Beban tambahan ini, dioperasikan fleksibel pada saat terdapat kelebihan energi pada PLTH. Simulasi dilakukan dengan penambahan beban tambahan sebesar 100 hingga 1000 W. Gambar 28 sampai Gambar 30 menunjukkan beberapa

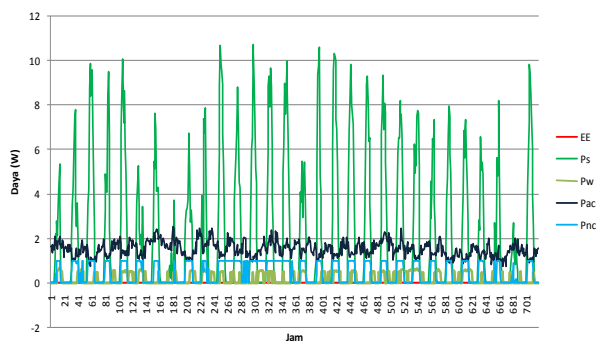
hasil simulasi pengoptimalan PLTH dengan beban tambahan 200 W, 500 W dan 1000 W.



Gambar 11. Simulasi dengan beban tambahan 200 W



Gambar 12. Simulasi dengan beban tambahan 500 W

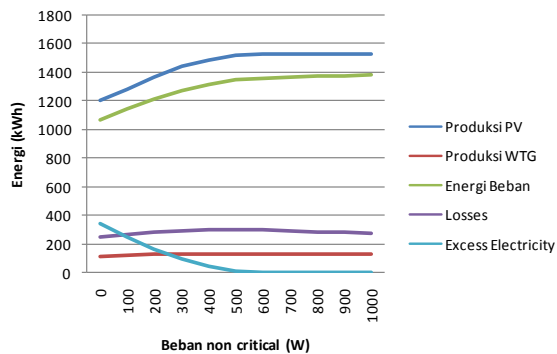


Gambar 13. Simulasi dengan beban tambahan 1000 W

Dari hasil simulasi tersebut diperlihatkan bahwa pengoperasian beban tambahan mengurangi *excess electricity* pada PLTH dan menaikkan pemanfaatan energi yang dihasilkan oleh *array* PV dan WTG. Penurunan *excess electricity* sebanding dengan nilai beban tambahan yang terpasang. Ringkasan hasil simulasi pada berbagai nilai beban tambahan disajikan pada Gambar 14.

Pada kasus nilai beban tambahan yang lebih besar, maka beban tambahan tersebut tidak dioperasikan secara terus menerus, atau hanya pada saat potensi energi dari *array* PV dan WTG bernilai tinggi. Kenaikan nilai beban tambahan lebih lanjut, dengan strategi pengoperasian beban tambahan yang tepat hanya memberikan sedikit

pengaruh pada energi yang terpakai pada beban dan penurunan losses sistem.



Gambar 14. Simulasi pengoptimalan PLTH dengan beban tambahan

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dilakukan analisis pengoptimalan operasi Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTH) Surya-Angin dengan studi kasus pada PLTH Surya - Angin Pantai Baru Bantul. Model pengoptimalan operasi PLTH Surya Angin bertujuan untuk meminimalkan *excess electricity* dan memaksimalkan pemanfaatan potensi energi terbarukan dengan memperhatikan batasan-batasan yang terkait dengan kapasitas *array PV*, kapasitas *Wind Turbine Generator*, daya pembangkitan *array PV* dan WTG, kapasitas inverter, dan batasan operasional baterai meliputi : kapasitas baterai, *deep of discharge* (DOD), status pengisian (*state of charge*), efisiensi baterai, serta batas laju pengisian dan pengosongan baterai. Formulasi permasalahan optimisasi dan batasan operasi disusun dalam model *Mix Integer Linear Programming* dan diselesaikan menggunakan toolbox optimisasi Tomlab CPLEX. Simulasi model optimisasi menggunakan data PLTH Surya Angin Pantai Baru grup KKP dilakukan dengan skenario penambahan beban *dummy* pada sistem PLTH. Berdasarkan hasil simulasi 720 jam kondisi eksisting menunjukkan nilai *excess electricity* yang tinggi sebesar 340,50 kWh atau 28,26% dari produksi energi. Dengan penambahan beban *dummy* nilai *excess electricity* tersebut dapat dikurangi dan pemanfaatan energi pada beban dapat dimaksimalkan.

Referensi

[1]. Engin, Mustafa. 2013. Sizing and Simulation of PV-Wind Hybrid Power System. International Journal of Photoenergy. Volume 2013.
 [2]. Rosyid O.A, 2011. Pembangkit Listrik Tenaga Surya Hibrida Untuk Listrik Pedesaan di Indonesia. Jurnal Material dan Energi Indonesia Vol. 01, No. 01 (2011).

[3]. Purnamasari Ratih. 2013. Pengembangan Energi Terbarukan Tenaga Angin dan Surya Di Desa Ngentak Kabupaten Bantul. Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Sumber Daya Pedesaan dan Kearifan Lokal Berkelanjutan III, Purwokerto, 26 - 27 November 2013.
 [4]. Transista Irna. Analisis Kontribusi Kincir Angin Pada Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Di Pantai Baru Ngentak Bantul. Thesis. Universitas Gadjah Mada Yogyakarta; 2012
 [5]. Santosa Okky Wisnu Murti. Studi Analisis Kontribusi Panel Surya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Di Pantai Baru Ngentak Bantul. Thesis. Universitas Gadjah Mada Yogyakarta; 2012.
 [6]. Winasis, Rosyadi Imron, Sarjiya, Wahyunggoro Oyas. 2014. Evaluasi Unjuk Kerja Sistem Photovoltaic 12 KWP Pada Pembangkit Listrik Hibrida Surya - Angin Pantai Baru Bantul. Seminar Nasional Teknik (SENATEK) 2014. Purwokerto 27 September 2014. pages : 114 - 119.
 [7]. Hong Ying-Yi, Chiu Ching-Sheng, Li Chang-Ting, 2007. KW Scheduling in an Autonomous System. Power Tech 2007 IEEE Lausanne Conference Paper 1-5 July 2007, page(s): 1730 -1735
 [8]. Sopian Kamaruzzaman, Zaharim Azami, Ali Yusoff, Nopiah Zulkifli Mohd. 2008. Optimal Operational Strategy for Hybrid Renewable Energy System Using Genetic Algorithms. WSEAS Transactions on Mathematics. Issue 4, Volume 7, April 2008.
 [9]. T. Longenthiran, Dipti Srinivasan. "Short Term Generation Scheduling of a Microgrid". IEEE Tencon , 2009.
 [10]. Sarjiya, Haryono, T., Winasis, "Optimal Scheduling of Hybrid Renewable Energy System Using MIPQ Method", AUN/SEED-Net Regional Conference in Electrical and Electronics Engineering, 2013
 [11]. [10] Khodr, H.M.et all. 2010. Optimal methodology for renewable energy dispatching in islanded operation. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES, page(s): 1 – 7.
 [12]. Winasis, Sarjiya, Haryono T. 2012. Optimal Scheduling of Hybrid Renewable Generation System Using Mix Integer Linear Programming. International Conference On Information Technology And Electrical Engineering (ICITEE). Yogyakarta 12 July 2012
 [13]. Freris Leon, Infield David, 2008. Renewable Energy in Power Systems. John Wiley & Sons, Ltd.
 [14]. Arulmurugan R, Vanitha Suthanthira. 2012. Optimal Design of DC to DC Boost Converter with Closed Loop Control PID Mechanism for High Voltage Photovoltaic Application. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS) Vol.2, No.4, December 2012, pp. 434-444.
 [15]. Deep Cycle Battery FAQ. diakses dari : <http://www.solar-electric.com/deep-cycle-battery-faq.html>.
 [16]. Vignola Frank, Mavromatakis Fotis, Krumsick Jim. Performance of PV Inverters. 2014. diakses dari : http://www.researchgate.net/publication/260286647_Performance_of_PV_inverters.
 [17]. https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_system. diakses pada