

ANALISA OPTIMASI MODULAR DISTRIBUTED GENERATION UNTUK BEBAN LISTRIK TERISOLASI

Yusak Tanoto

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Kristen Petra
Jl. Siwalankerto 121-131 Surabaya
Telp. (031) 2983445
e-Mail : tanyusak@petra.ac.id

Abstrak

Elektrifikasi adalah salah satu faktor pendorong penting bagi pembangunan pada daerah pedesaan. Pertimbangan ekonomis seperti tingginya biaya infrastruktur jaringan berkaitan dengan kondisi geografis dan rendahnya potensi penggunaan listrik menyebabkan banyak daerah pelosok pedesaan terisolasi dari jaringan listrik PLN. Makalah ini membahas alternatif penyediaan energi listrik memanfaatkan sumber energi terbarukan pada beban listrik rumah tangga di daerah pedesaan yang terisolasi melalui optimasi teknologi modul pembangkitan energi listrik terdistribusi (stand-alone modular distributed generation). Pilihan teknologi yang dianalisa adalah solar home system dan home wind turbine, sedangkan optimasi pemilihan modul mempertimbangkan aspek teknis, diantaranya rata-rata radiasi harian matahari per bulan, rata-rata kecepatan angin per bulan, dan keandalan sistem, serta aspek ekonomis yang meliputi analisa biaya energi dan biaya sistem yang dipengaruhi oleh masa layanan sistem. Berdasarkan analisa sensitifitas terhadap variabel kebutuhan energi (kWh/hari) dan kecepatan angin (m/s), diperoleh optimasi konfigurasi sistem hibrid dengan variasi biaya energi (USD/kWh), dimana biaya energi akan berkurang seiring peningkatan kebutuhan energi. Sementara itu, di tingkat kebutuhan energi listrik yang tinggi, penurunan biaya energi juga didapat dari kontribusi daya listrik yang dihasilkan oleh home wind turbine.

Kata Kunci : beban terisolasi, energi terbarukan, modular distributed generation, optimasi, solar home system, home wind turbine.

Pendahuluan

Kondisi kelistrikan nasional secara menyeluruh dapat teridentifikasi dengan rendahnya rasio elektrifikasi, rendahnya tingkat penggunaan, dan masih rendahnya efisiensi saluran transmisi dan distribusi listrik [1]. Masih rendahnya konsumsi energi listrik nasional *per capita* dan rendahnya rasio elektrifikasi Indonesia [2] menyiratkan rendahnya penetrasi jaringan listrik PLN di pelosok pedesaan. Kondisi geografis yang menyulitkan ditambah dengan persebaran rumah-rumah serta rendahnya penggunaan menyebabkan tidak ekonomisnya penyediaan jaringan listrik PLN. Penyediaan listrik mandiri dari sumber energi terbarukan dapat menjadi solusi dengan memanfaatkan berbagai pilihan teknologi *stand-alone distributed generation*, diantaranya PV (*photovoltaic*) dan WT (*wind turbine*). Dua aspek penting yang perlu mendapat perhatian pada desain PV dan WT adalah keandalan suplai dan biaya total sistem [3]. Sementara itu, konfigurasi PV dan WT merupakan sistem hibrid yang efektif dan juga mampu menyediakan suplai listrik secara handal pada daerah terisolasi dari jaringan jika dibandingkan dengan pilihan ekstensifikasi jaringan [4]. Di sisi lain, setiap 1 kWh WT menggantikan emisi *greenhouse gases* yang dihasilkan

setiap 1 kWh pembangkit berbahan bakar fosil [5]. Pada makalah ini, penyediaan suplai listrik mandiri (*off-grid distributed generation*) memanfaatkan teknologi PV (*solar home system*) dan WT (*home wind turbine*) untuk beban rumah tangga pada daerah pedesaan terisolasi disimulasikan menggunakan *software HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable)*. Optimalisasi pemilihan teknologi mempertimbangkan aspek teknis, diantaranya kebutuhan beban listrik, rata-rata radiasi harian matahari, rata-rata kecepatan angin, dan keandalan sistem, serta aspek ekonomis yang meliputi analisa komponen biaya energi dan biaya sistem. Data simulasi, pemodelan sistem, simulasi dan analisa hasil, dan kesimpulan masing-masing dipaparkan pada bagian selanjutnya.

Metodologi Penelitian

Pada makalah ini, penyediaan suplai listrik mandiri (*off-grid distributed generation*) memanfaatkan teknologi PV (*solar home system*) dan WT (*home wind turbine*) untuk beban rumah tangga pada daerah pedesaan terisolasi disimulasikan menggunakan perangkat lunak HOMER (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewable*). Data simulasi yang diperlukan meliputi:

Prosiding Seminar Nasional Teknoin 2010 Bidang Teknik Elektro

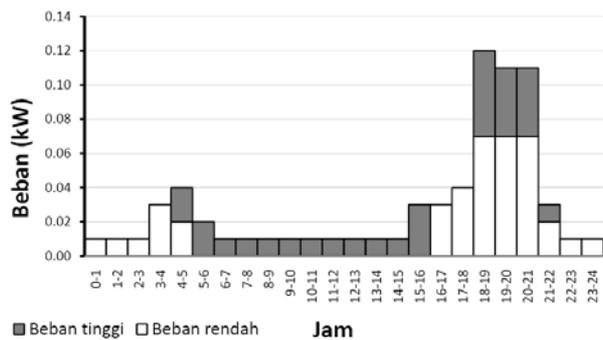
penentuan lokasi, data beban listrik rumah tangga, data profil beban harian, spesifikasi *solar home system*, spesifikasi *home wind turbine*, dan data keadaan cuaca. Lokasi yang dipilih pada simulasi ini adalah Baa, Kabupaten Rote Ndao, Nusa Tenggara Timur, dengan koordinat geografis 10°50' S dan 123°0' T. Data tipikal beban listrik rumah tangga pedesaan disajikan pada Tabel 1 [6].

Tabel 1 Tipikal beban listrik rumah tangga pedesaan

Peralatan listrik	Jumlah, Daya (Watt)	Rata-rata pemakaian (Jam/hari)	Kebutuhan energi (Watt/hari)
Beban terpasang dan penggunaan rendah			
Lampu			
• Ruang/kamar	2 x 10	5	100
• Penyimpanan	1 x 10	5	50
• Teras	1 x 10	10	100
Tape/radio	1 x 30	5	150
Total	70	-	400
Beban terpasang dan penggunaan tinggi			
Lampu			
• Ruang/kamar	3 x 10	6	180
• Dapur	1 x 10	3	30
• Teras	1 x 10	10	100
• Toilet	1 x 10	1	10
Tape/radio	1 x 30	4	120
TV/VCR	1 x 70	3	210
Total	160	-	650

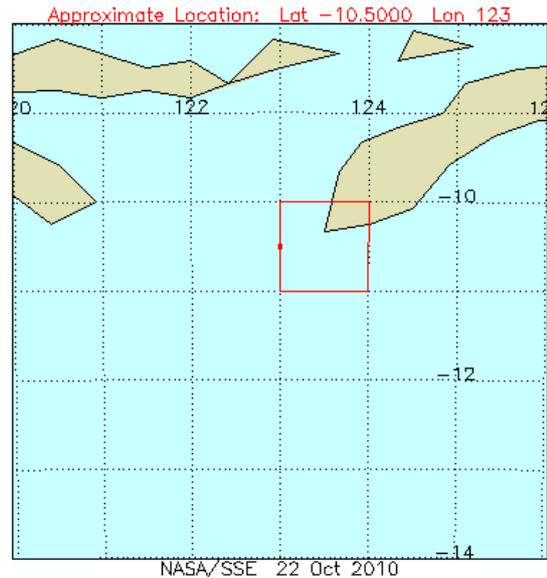
Sumber: Lhendup (2008), diolah kembali

Tipikal profil beban harian pada seperti pada Tabel 1 diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tipikal profil beban harian

Data lokasi, data cuaca, serta grafis radiasi horizontal global terdapat pada Gambar 2, Tabel 2, dan Gambar 3.

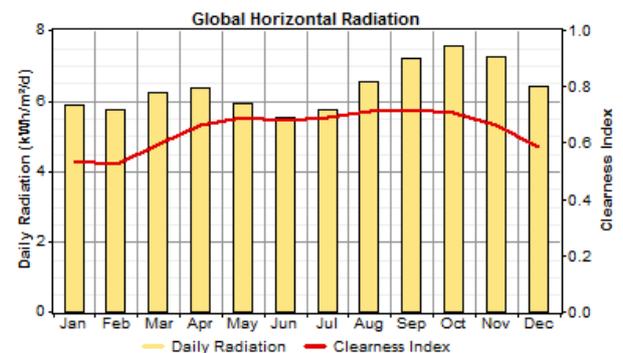


Gambar 2. Lokasi menurut satelit NASA

Tabel 2 Data keadaan cuaca

Bulan	Radiasi harian (kWh/m ² /hari)	Kecepatan angin (m/s)*
Januari	5.87	4.91
Februari	5.73	5.13
Maret	6.25	3.82
April	6.35	4.03
Mei	5.93	5.00
Juni	5.52	5.47
Juli	5.76	5.00
Agustus	6.53	4.19
September	7.21	3.25
Oktober	7.54	2.72
Nopember	7.25	2.82
Desember	6.41	3.98

Sumber: NASA *)diukur pada ketinggian 10 m

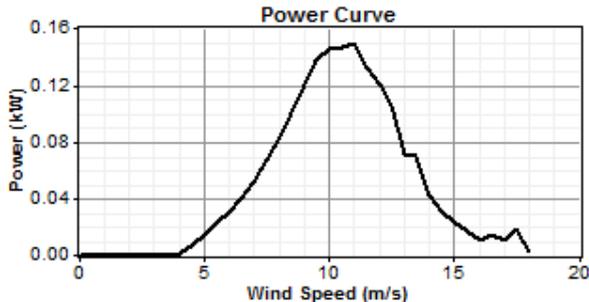


Gambar 3. Radiasi horizontal global lokasi terpilih Data spesifikasi teknis *solar home system*, *battery*, *charge controller*, dan *home wind turbine* terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3 Data spesifikasi teknis

Deskripsi	Data
PV Modul	
<i>Rated output</i>	135 Watt <i>peak</i>
<i>Maximum voltage</i>	17.7 V
<i>Maximum current</i>	7.63 A
<i>Open circuit voltage</i>	22.1 V
<i>Short circuit current</i>	8.37 A
<i>Maximum system voltage</i>	600 V DC
<i>De-rating factor (incl. charge cont)</i>	85%
Battery	
<i>Nominal voltage</i>	12 V
<i>Nominal capacity</i>	200 Ah, 2.4 kWh
<i>State of Charge (SOC)</i>	40%
<i>Lifetime throughput</i>	917 kWh
Charge controller	
<i>Maximum current</i>	10 A
Wind turbine	
<i>Rotor diameter</i>	1.15 m
<i>Nominal voltage</i>	12/24/48 V DC
<i>Nominal capacity per month</i>	38 kWh, 5.4 m/s
<i>Starting speed</i>	3.58 m/s

Home wind turbine mempunyai rating daya sebesar 400 Watt pada kecepatan 12.5 m/s. Kurva daya *home wind turbine* yang digunakan pada makalah ini terdapat pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva daya *home wind turbine*

Sementara itu, standar internasional biaya awal komponen (*initial capital cost*) yang digunakan pada Tabel 3 terdapat pada Tabel 4.

Tabel 4 Standar harga komponen [7]

Komponen	Standar harga
PV Modul	USD 3.59 per Watt <i>peak</i>
<i>Charge controller</i>	USD 5.87 per Ampere
<i>Battery</i>	USD 0.207 per Watt output

Sumber: SEIRC (2010)

Data ekonomis dari komponen-komponen yang digunakan termasuk biaya awal komponen dan asumsi-asumsi lainnya diberikan pada Tabel 5, dimana harga komponen telah seturut dengan standar harga yang terdapat pada Tabel 4.

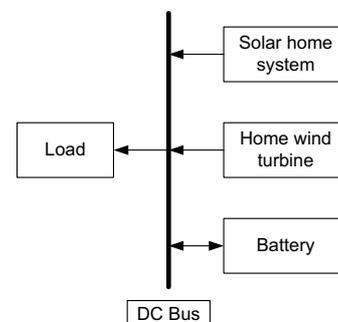
Tabel 5 Data ekonomis sistem hibrid

Komponen	Masa layanan	Biaya (USD)
PV Modul + <i>charge controller</i>	25 tahun	<i>Initial</i> : 530 <i>Replacement</i> : 430 <i>O&M</i> : 0
<i>Wind turbine</i>	15 tahun	<i>Initial</i> : 700 <i>Replacement</i> : 300 <i>O&M</i> : 0
<i>Battery</i>	5 tahun	<i>Initial</i> : 480 <i>Replacement</i> : 380 <i>O&M</i> : 3

Pada Tabel 5, *initial* berarti biaya awal komponen, merupakan total biaya yang diperlukan untuk instalasi komponen pada awal masa layanan proyek, *replacement* adalah biaya penggantian keseluruhan atau sebagian komponen setelah masa layanannya habis, dan *O&M* adalah biaya operasional dan perawatan komponen per tahun. Masa layanan proyek (*project lifetime*) adalah 25 tahun, dan suku bunga riil per tahun ditetapkan sebesar 8%. Data-data ekonomis ini selanjutnya digunakan pada simulasi untuk menentukan *total net present cost* dan biaya energi (*cost of energy*) dari alternatif-alternatif sistem hibrid yang disimulasikan.

Pemodelan sistem hibrid

Konfigurasi sistem kelistrikan hibrid yang terhubung dengan beban listrik rumah tangga disusun seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Konfigurasi sistem hibrid 12 Volt DC

Data teknis dari suplai energi hibrid yang akan disimulasikan (terdiri dari *solar home sistem*, *home wind turbine*, dan *battery*) dimodelkan menurut persamaan matematika untuk tiap komponen.

- PV Modul

Daya output P_{PV} (DC) dari *solar home system* (PV modul) yang dibangkitkan dengan mengabaikan efek temperatur pada PV modul dapat ditentukan menurut persamaan (1).

$$P_{PV} = Y_{PV} \cdot f_{PV} \left(\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) \quad (1)$$

Prosiding Seminar Nasional Teknoin 2010 Bidang Teknik Elektro

dimana: Y_{pv} = Daya output pada pengujian dengan kondisi standar (kW);
 f_{pv} = PV de-rating factor;
 G_T = Radiasi sesaat pada PV modul (kW/m²);
 $G_{T,STC}$ = Radiasi sesaat menurut kondisi standar pengujian (1 kW/m²).

• Wind turbine

Daya (W) maksimum yang dapat dibangkitkan *home wind turbine* ditentukan menurut persamaan (2).

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_{PMax} \quad (2)$$

dimana: P = Daya yang dibangkitkan (W);
 ρ = densitas udara (kg/m³);
 A = Luas area baling-baling (m²);
 V = Kecepatan angin (m/s);
 C_{PMax} = Koefisien daya teoritis (0.59).

• Battery

Daya maksimum yang dapat diserap dan yang dapat dilepaskan (*maximum charge/discharge power*) oleh *battery* (aki) dapat ditentukan berdasarkan persamaan (3) dan persamaan (4), sebelum memperhitungkan efisiensi *charge* dan *discharge*.

$$P = \frac{kQ_1 e^{-k\Delta t} + Qkc(1 - e^{-k\Delta t})}{(1 - e^{-k\Delta t}) + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (3)$$

$$P = \frac{-kcQ_{max} + kQ_1 e^{-k\Delta t} + Qkc(1 - e^{-k\Delta t})}{1e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (4)$$

dimana: Q_1 = Energi mula-mula yang **tersedia** pada aki (kWh);
 Q = Total energi mula-mula yang tersimpan pada aki (kWh);
 c = Rasio kapasitas;
 k = Konstanta *rate* (h⁻¹);
 Δt = Durasi interval waktu (jam);
 Q_{max} = Kapasitas total aki (kWh).

Secara keseluruhan, indikator ekonomis dari sistem hibrid pada makalah ini terdiri dari:

- Biaya awal (IC) dalam USD;
- Biaya operasional (OC) dalam USD/tahun, yaitu agregat dari biaya operasional dan perawatan per tahun, total biaya bahan bakar, dan biaya penggantian komponen disetahunkan (*annualized replacement cost*) dikurangi dengan biaya penyusutan,
- *Total net present cost* (TNPC) dalam USD;
- Biaya energi (COE) dalam USD/kWh.

TNPC dari sistem hibrid merupakan total biaya pada tahun ke-n selama masa layanan proyek dikurangi total penerimaan (*revenue*) sepanjang periode yang sama. Pada makalah ini, komponen penerimaan adalah nilai penyusutan komponen hibrid (*salvage value*) saja tanpa memperhitungkan penerimaan dari penjualan listrik ke jaringan karena sistem hibrid tidak terhubung dengan jaringan listrik, sehingga TNPC ditentukan menurut persamaan (5).

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, R_{proj})} \quad (5)$$

dimana: $C_{ann,tot}$ = Biaya disetahunkan (USD/tahun)
 CRF = *Capital recovery factor*
 i = Suku bunga riil (%)
 R_{proj} = Masa layanan proyek (tahun)

CRF dihitung berdasarkan persamaan (6).

$$CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (6)$$

dimana: i = suku bunga riil (%);
 N = tahun.

Nilai penyusutan dari tiap komponen ditentukan berdasarkan persamaan (7).

$$S = C_{rep} \frac{R_{comp} - (R_{proj} - R_{rep})}{R_{comp}} \quad (7)$$

dimana: S = Nilai penyusutan (USD);
 C_{rep} = Biaya penggantian komponen (USD);
 R_{proj} = Masa layanan proyek (tahun);
 R_{rep} = Durasi waktu penggantian (tahun);
 R_{comp} = Masa layanan komponen (tahun).

Biaya energi (*cost of energy*) dihitung berdasarkan biaya rata-rata untuk memproduksi per kWh energi listrik, dimana energi listrik yang diperhitungkan adalah total energi listrik yang dipergunakan oleh beban selama setahun (*load served*). *Cost of energy* ditentukan menurut persamaan (8).

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{DC}} \quad (8)$$

dimana: COE = Biaya energi (USD/kWh)
 $C_{ann,tot}$ = Biaya disetahunkan (USD/tahun)
 E_{DC} = Energi listrik yang dipergunakan oleh beban DC (kWh/tahun)

Simulasi dan analisa hasil

HOMER melakukan simulasi operasional sistem berdasarkan prinsip *energy balance* setiap jam selama 8,760 jam dalam satu tahun. Kebutuhan energi pada beban dan jumlah energi yang dapat disuplai setiap jam dibandingkan dan dihitung aliran energinya diantara satu komponen ke dan dari komponen lainnya. Penentuan konfigurasi sistem hibrid yang optimal ditentukan dari terpenuhinya permintaan energi pada beban dengan mempertimbangkan kondisi-kondisi teknis dan ekonomis, antara lain: defisit kapasitas energi tahunan (*maximum annual capacity shortage*), *minimum* TNPC dan *minimum* COE.

Pada simulasi ini, terdapat beberapa pengaturan pada keadaan radiasi matahari, instalasi PV modul, kondisi angin, dan kondisi beban. Rata-rata tahunan radiasi harian ditetapkan sebesar 6.37 kWh/m²/hari, yang merupakan rata-rata radiasi matahari dalam setahun seperti terdapat pada Tabel 2. Kemiringan PV modul ditetapkan sebesar 10.50° mengikuti koordinat lintang, *azimuth* 180° (menghadap utara), pantulan tanah (*ground reflectance*) sebesar 20%, dan dipasang secara permanen (tidak dilengkapi dengan sistem *tracking*). Pada pengaturan kondisi angin, tinggi tower ditetapkan sebesar 10 meter, ketinggian lokasi 50 meter dpl, *weibull coefficient* 2, durasi puncak kecepatan angin 15 jam/hari, dan kecepatan angin ditentukan sebesar 3.5 (mempertimbangkan *starting speed*), 4, 5, dan 5.5 m/s (kecepatan angin tertinggi dalam setahun) sebagai salah satu variabel sensitifitas. Kebutuhan energi per hari (kWh/hari) sebesar 0.4 (skenario beban terpasang dan penggunaan rendah), 0.5, 0.6, dan 0.65 (skenario beban terpasang dan penggunaan tinggi) menjadi variabel sensitifitas ke dua. Untuk mendapatkan konfigurasi optimal dari sistem hibrid (jumlah dan ukuran PV modul, WT, dan *battery*), alternatif ukuran PV modul pada simulasi ini: 50, 85, 100, 125, 135, 185, dan 270 Watt *peak*. Setting jumlah *wind turbine* sebanyak 0 hingga 1 unit, dan alternatif jumlah *battery* sebanyak 0 hingga 3 unit.

Pada makalah ini, penentuan konfigurasi sistem hibrid untuk setiap ukuran komponen disimulasikan terhadap indikator IC, TNPC, dan COE, untuk setiap alternatif kebutuhan energi per hari dan setiap alternatif kecepatan angin. Selanjutnya, konfigurasi optimal sistem hibrid (PV, WT, *Battery*) dipilih berdasarkan indikator *minimum initial capital* (IC), *operating cost per year* (OC), *minimum* TNPC, dan *minimum* COE untuk setiap alternatif variabel sensitifitas. Konfigurasi optimal sistem hibrid diberikan pada Tabel 6.

Tabel 6 Konfigurasi optimal sistem hibrid

Konf.	Energi (kWh/hari)	Kec. Angin (m/s)	Sistem hibrid		
			PV (Wp)	WT	Batt
1	0.4	3.5	125	0	1
2	0.4	4	125	0	1
3	0.4	5	125	0	1
4	0.4	5.5	125	0	1
5	0.5	3.5	135	0	1
6	0.5	4	135	0	1
7	0.5	5	135	0	1
8	0.5	5.5	135	0	1
9	0.6	3.5	185	0	2
10	0.6	4	185	0	2
11	0.6	5	100	1	1
12	0.6	5.5	85	1	1
13	0.65	3.5	185	0	2
14	0.65	4	185	0	2
15	0.65	5	125	1	1
16	0.65	5.5	100	1	1

Tabel 7 Aspek ekonomis konfigurasi optimal sistem hibrid

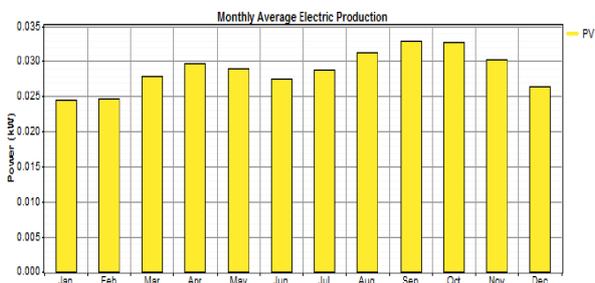
Konf.	IC (USD)	OC (USD/thn)	TNPC (USD)	COE (USD/kWh)
1	971	40	1,394	0.894
2	971	40	1,394	0.894
3	971	40	1,394	0.894
4	971	40	1,394	0.894
5	1,010	54	1,581	0.812
6	1,010	54	1,581	0.812
7	1,010	54	1,581	0.812
8	1,010	54	1,581	0.812
9	1,686	53	2,250	0.962
10	1,686	53	2,250	0.962
11	1,573	46	2,068	0.885
12	1,514	41	1,955	0.836
13	1,686	59	2,319	0.916
14	1,686	59	2,319	0.916
15	1,671	52	2,221	0.877
16	1,573	47	2,070	0.817

Dari Tabel 7, terlihat bahwa besarnya beberapa jenis biaya, termasuk biaya energi tergantung pada variabel sensitifitas. Berdasarkan Tabel 6 dan Tabel 7, untuk kondisi kebutuhan energi yang rendah, yaitu 0.4 kWh/hari, didapatkan nilai IC, OC, TNPC, dan COE masing-masing sebesar USD 971, USD 40/tahun, USD 1,394, dan USD 0.894/kWh, dengan konfigurasi 1 buah PV modul 125 Wp dan 1 buah *battery* 12 V 200 Ah, tanpa perlu memasang *wind turbine*. Demikian pula untuk 0.5 kWh/hari, nilai IC, OC, TNPC, dan COE masing-masing sebesar USD 1,010, USD 54/tahun, USD 1,581, dan USD 0.812/kWh. Dalam hal ini, kenaikan IC, OC, dan TNPC disebabkan oleh peningkatan kapasitas daya output PV menjadi 135 Wp. Disisi lain, kebutuhan energi yang tinggi

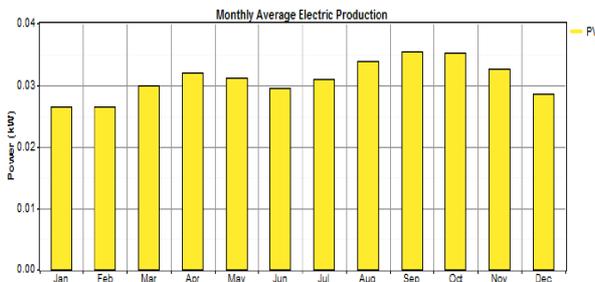
Prosiding Seminar Nasional Teknoin 2010

Bidang Teknik Elektro

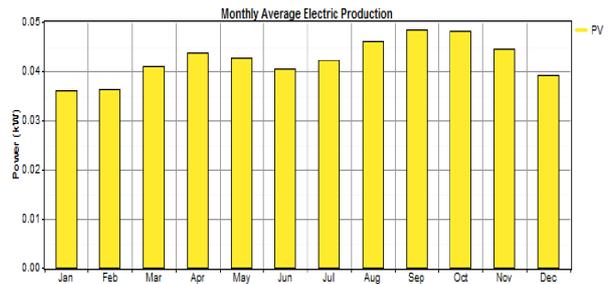
menyebabkan COE menjadi lebih rendah karena adanya peningkatan produksi energi listrik oleh PV modul. Sementara itu, untuk kebutuhan energi yang relatif tinggi, yaitu 0.6 kWh/hari, faktor kecepatan angin mempengaruhi konfigurasi optimal sistem hibrid, dimana untuk kecepatan 5-5.5 m/s, konfigurasi optimal diperoleh dari masing-masing 1 PV modul 100 Wp, 1 WT, 1 *battery* untuk kecepatan 5 m/s, dan 1 PV modul 85 Wp, 1 WT, 1 *battery* untuk kecepatan 5.5 m/s. Untuk kebutuhan energi 0.65 kWh/hari dan kecepatan angin 5-5.5 m/s, konfigurasi optimum didapat dari masing-masing 1 PV modul 125 WP, 1 WT, 1 *battery*, dan 1 PV modul 100 Wp, 1 WT, 1 *battery*. Secara keseluruhan, penambahan 1 WT untuk kondisi kebutuhan energi 0.65 kWh/hari dan peningkatan kecepatan angin dari 3.5-5.5 m/s mengurangi kebutuhan daya output PV modul hingga 85 Wp dan kebutuhan *battery* menjadi hanya 1 unit. Pada aspek ekonomis, terjadi penurunan IC, TNPC, dan COE pada sistem hibrid dengan 1 unit WT untuk kondisi kebutuhan energi yang semakin besar, yaitu 0.6 hingga 0.65 kWh/hari. Secara keseluruhan, COE untuk 0.65 kWh/hari dengan kecepatan angin 5.5 m/s menjadi yang terendah diantara 16 konfigurasi untuk berbagai kondisi pembebanan dan kecepatan angin, yaitu sebesar USD 0.817/kWh. Produksi listrik rata-rata per bulan (kW) selama setahun untuk seluruh kondisi variabel sensitifitas diberikan pada gambar-gambar berikut ini.



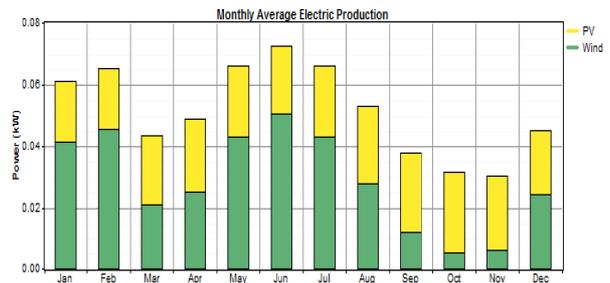
Gambar 6. Kebutuhan energi 0.4 kWh/hari dan kecepatan angin 3.5 hingga 5.5 m/s.



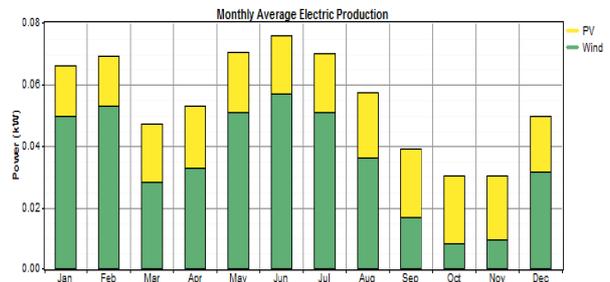
Gambar 7. Kebutuhan energi 0.5 kWh/hari dan kecepatan angin 3.5 hingga 5.5 m/s.



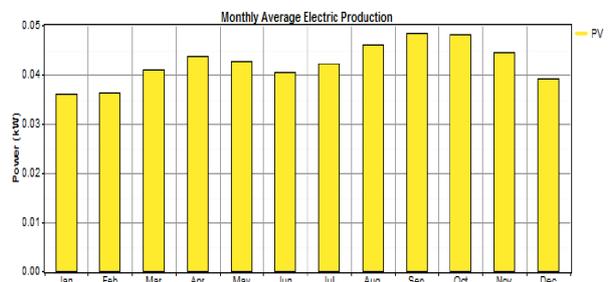
Gambar 8. Kebutuhan energi 0.6 kWh/hari dan kecepatan angin 3.5 hingga 4 m/s.



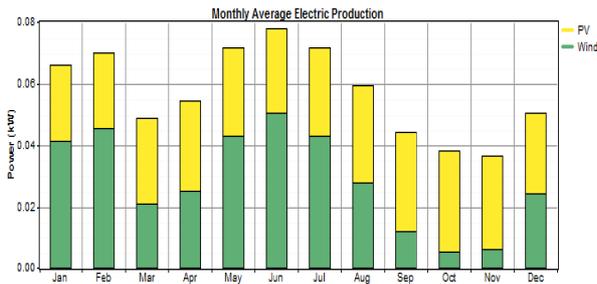
Gambar 9. Kebutuhan energi 0.6 kWh/hari dan kecepatan angin 5 m/s.



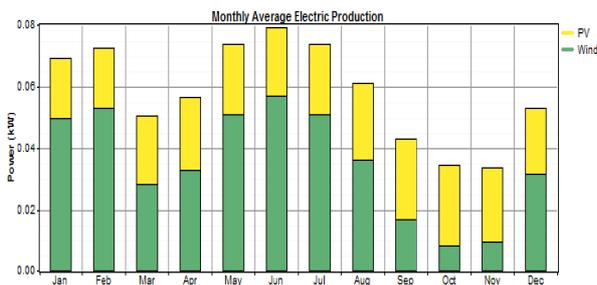
Gambar 10. Kebutuhan energi 0.6 kWh/hari dan kecepatan angin 5.5 m/s.



Gambar 11. Kebutuhan energi 0.65 kWh/hari dan kecepatan angin 3.5 hingga 4 m/s.



Gambar 12. Kebutuhan energi 0.65 kWh/hari dan kecepatan angin 5 m/s



Gambar 13. Kebutuhan energi 0.65 kWh/hari dan kecepatan angin 5.5 m/s

Produksi listrik oleh sistem hibrid dan penggunaan energi listrik oleh beban listrik DC rumah tangga untuk setiap konfigurasi optimal sistem hibrid terdapat pada Tabel 8, dimana terdapat kelebihan energi/*excess electricity* (kWh/tahun) untuk setiap konfigurasi, yang merupakan selisih dari total energi listrik yang diproduksi selama satu tahun dengan energi listrik yang dikonsumsi oleh beban listrik rumah tangga selama satu tahun.

Tabel 8 Produksi, penggunaan, dan *excess electricity* (kWh/tahun)

Konf.	PV	WT	Penggunaan	<i>Excess electricity</i>
1	252	0	146	78
2	252	0	146	78
3	252	0	146	78
4	252	0	146	78
5	272	0	183	54
6	272	0	183	54
7	272	0	183	54
8	272	0	183	54
9	373	0	219	111
10	373	0	219	111
11	201	252	219	206
12	171	309	219	236
13	373	0	237	89
14	373	0	237	89
15	252	252	237	235
16	201	309	237	246

Demikian pula, produksi energi listrik dari *wind turbine* cukup signifikan pada kecepatan angin 5 m/s, yaitu sama dengan atau melampaui PV modul. Pada kecepatan angin 5.5 m/s, produksi listrik dari *wind turbine* relatif jauh melebihi produksi listrik PV modul, yaitu 61% dari *wind turbine* dibanding 39% dari PV modul.

Kesimpulan

Dari studi ini, didapatkan kesimpulan bahwa penggunaan suplai energi alternatif khususnya sistem hibrid PV-WT-Battery pada beban listrik rumah tangga di daerah terisolasi dengan kondisi skenario beban rendah dan tinggi dapat diimplementasikan dengan mempertimbangkan faktor-faktor sebagai variabel sensitifitas. Di tingkat kebutuhan energi yang tinggi, COE dapat ditekan menjadi lebih kecil karena masuknya suplai *wind turbine*. Di sisi lain, kelebihan pasokan energi dapat dimanfaatkan untuk penyediaan suplai listrik bagi beban listrik tambahan, yang berguna bagi peningkatan kualitas pembangunan di daerah tersebut dengan memanfaatkan teknologi pembangkitan listrik hibrid yang ramah lingkungan.

Daftar Pustaka

- [1] Yusak Tanoto. (2010). *Clean Development Mechanism (CDM) dan Kaitannya Pada Pengelolaan Energi dan Lingkungan Hidup Dalam Konteks Perubahan Iklim di Indonesia. Data Akuisisi Untuk Proses Perpindahan Panas*. Prosiding Seminar, Surabaya.
- [2] Asian Development Bank, International Labour Organization, and Islamic Development Bank (2010). *Country Diagnostics Studies Indonesia: Critical Development Constraints*. Manila.
- [3] Belfkira, R., Nichita, C., Reghem, P., Barakat, G. (2008). *Modelling and Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy System*. Prosiding IEEE conf. Power Electron Motion Control, p. 1834-9.
- [4] Haidar, A.M.A., John, P.N., Shawal, M. (2010). *Optimal Configuration Assessment of Renewable Energy in Malaysia. Renewable Energy 36: 881-888*.
- [5] Baring, G.I., Corbus, D. (2007). *Status of Wind-Diesel Applications in Arctic Climates*. Prosiding Conf. The Arctic Energy Summit Technology Anchorage, Alaska. P 1-17.
- [6] Lhendhup, T. (2008). *Rural Electrification in Bhutan and a Methodology for Evaluation of Distributed Generation System as an Alternative Option for Rural Electrification. Energy for Sustainable Development Vol. 12 no. 3 p. 13-24*.
- [7] Solar Energy Industry Research and Consultancy. Diakses 10 Agustus 2010, dari <http://www.solarbuzz.com/index.asp>