

PERENCANAAN SISTEM PHOTOVOLTAIC BEBAN ARUS SEARAH TERHUBUNG JALA – JALA

Winasis¹, Muhammad Syaiful Haliim², Hari Prasetyo³

¹⁻³ Jurusan Teknik Elektro, Universitas Jenderal Soedirman

Korespondensi : winasis@unsoed.ac.id

Abstrak

Sistem Photovoltaic (PV) memanfaatkan energi matahari sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan. Sebuah sistem PV dapat dihubungkan dengan jala-jala utilitas untuk menjamin kehandalan. Penelitian ini mengusulkan model sistem PV beban arus searah pada instalasi rumah tinggal terhubung ke jala – jala. Analisis optimal sistem PV dilakukan dengan membandingkan arsitektur, produksi energi, rugi – rugi, kehandalan serta analisis keekonomian dengan memperhatikan kekangan fraksi energi terbarukan dan capacity shortage. Hasil analisis menunjukkan koneksi sistem PV dengan jala-jala mengurangi kebutuhan kapasitas modul sel surya dan baterai dengan tingkat kehandalan yang baik. Sistem terhubung jala - jala yang dilengkapi baterai memiliki tingkat utilisasi energi terbarukan terbaik dengan nilai excess electricity 2.19%. Dari aspek keekonomian, sistem dengan fraksi energi terbarukan yang lebih rendah memiliki biaya energi lebih murah. Hal ini disebabkan oleh masih tingginya harga komponen PV dibandingkan dengan harga listrik dari utilitas.

Kata kunci: sistem photovoltaic, beban DC, terhubung jala, utilisasi, kehandalan

Abstract

Photovoltaic (PV) systems utilize solar energy as a renewable energy source. A PV system can be connected to utility networks to ensure reliability. This study proposes a PV system model with direct current load on residential installation connected to utility grid. Optimal analysis of PV systems is done by comparing the architecture, energy production, losses, reliability and economic aspect considering the constraints of renewable energy fraction and capacity shortage. The results show PV system connections with grid reduce the capacity requirements of photovoltaic modules and batteries with a good level of reliability. The grid connected system equipped with batteries has the best level of renewable energy utilization with an excess electricity value of 2.19%. From an economic aspect, the system with the lower renewable energy fraction has less energy costs. This is due to the high price of PV components compared to the price of electricity from utility.

Keyword: photovoltaic system, DC load, grid connected, optimal, utilization, reliability

1. Pendahuluan

Energi listrik saat ini telah menjadi kebutuhan primer bagi kehidupan masyarakat. 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. Pemanfaatan energi matahari sebagai sumber energi ramah lingkungan untuk menghasilkan energi listrik dapat dilakukan salah satunya menggunakan metode *photoelectricity* menggunakan modul *photovoltaic* (PV) atau sel surya.

Terdapat beberapa tipe sistem PV yaitu: a) tipe *stand-alone*; b) tipe *hybrid* and; c) tipe *grid connected* [1]. Pada tipe *stand alone* beban listrik hanya ditopang oleh sistem pembangkit listrik tenaga surya. Untuk meningkatkan kehandalan sistem PV dapat dipadukan dengan pembangkit lain sebagai *hybrid system* atau dihubungkan dengan jala – jala listrik. Sistem PV tipe hibrida memadukan beberapa sumber energi baru dan terbarukan, sehingga diharapkan dapat menyediakan catu daya listrik yang lebih kontinyu dan efisiensi. Sedangkan sistem PV *grid connected* menggunakan jala – jala daya listrik utilitas sebagai backup [1] sehingga memiliki tingkat kehandalan yang paling tinggi.

Sistem *stand alone* dapat menggunakan output DC dari modul PV untuk menyalakan beban DC secara langsung, sementara bank baterai digunakan untuk menyimpan energi untuk dipakai ketika ada permintaan [2]. Sedangkan untuk menyuplai beban AC digunakan inverter untuk mengubah daya DC ke AC. Kelebihan dari tipe *stand-alone* ini adalah memiliki nilai praktis yang tinggi di area-area yang tidak terjangkau oleh jaringan listrik, seperti daerah terpencil, padang pasir dan perbatasan pos terdepan. Namun, daya listrik yang dihasilkan sel PV sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya dan suhu. Selain itu, sel PV tidak dapat menyimpan energi, sehingga diperlukan baterai untuk menyeimbangkan energi

sistem PV [3]. Guna mendapatkan tingkat kehandalan yang tinggi, Sistem PV *stand alone* membutuhkan sejumlah banyak baterai penyimpan energi untuk mengantisipasi kondisi cuaca buruk dimana PV hanya membangkitkan sedikit energi listrik. Hal ini tentu saja berdampak pada biaya investasi dan biaya energi (*cost of energy*) yang tinggi.

Koneksi sistem PV ke jala – jala listrik dapat menjamin kehandalan sistem dengan kebutuhan baterai yang minimal. Sebuah sistem terhubung jala listrik umumnya terdiri atas modul PV dan *inverter* untuk mengkonversi arus searah menjadi arus bolak – balik yang disinkronkan dengan sumber listrik utama sehingga kelebihan energi listrik yang dibangkitkan dapat dikirimkan ke jala – jala listrik. Samir Kouro [4] dan Mahela [5] memberikan gambaran ikhtisar komprehensif sistem PV terhubung jala – jala.

Salah satu permasalahan sistem PV terhubung jala adalah pada *inverter* yang merupakan komponen utama pada sistem PV terhubung jala – jala arus bolak balik. Eltawil [6] menyajikan *review* tentang masalah teknis dan potensial pada sistem PV terhubung jala – jala. Berdasarkan hasil survei, didapatkan bahwa *inverter* pada PV terhubung jala memiliki efisiensi dan faktor daya di atas 90% dengan THD harmonik arus dibawah 5%. Sementara Ekici menyajikan rugi – rugi energi pada sistem PV terhubung jala – jala dimana komponen inverter memberikan sumbangan rugi daya sebesar 3% [7].

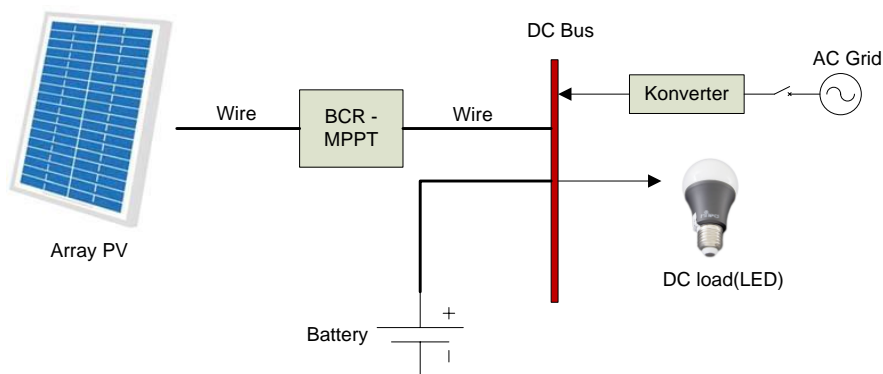
Pendekatan lain yang dikembangkan adalah sistem pembangkit terhubung grid DC sebagai sebuah *microgrid* DC. Hal ini didasarkan pada kenyataan bahwa kebanyakan beban elektronik pada instalasi rumah tinggal adalah beban arus searah. Penyaluran langsung energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS ke beban dalam bentuk DC memberikan keuntungan berupa pengurangan rugi daya pada yang piranti inverter. Naoki Ayai [8] menyebutkan beberapa tujuan *microgrid* DC yaitu : meningkatkan pemakaian unit PV terdistribusi dan mengurangi disipasi energi dan biaya fasilitas untuk konversi dari DC ke AC. Beberapa kelebihan dari sistem *microgrid* DC antara lain : rugi energi lebih rendah, kehandalan lebih tinggi dan biaya investasi lebih rendah.

Artikel ini menyajikan model sistem PV beban DC terhubung jala – jala listrik utilitas pada instalasi rumah tinggal. Dibandingkan dengan sistem PV terhubung jala listrik yang umumnya menggunakan bus beban arus bolak – balik, model sistem yang diusulkan menggunakan bus beban arus searah yang lebih efisien. Koneksi dengan jala – jala utilitas bertujuan untuk menjamin kehandalan sistem. Beban DC yang disuplai adalah beban penerangan lampu DC LED yang sekarang ini banyak dikembangkan karena lebih hemat energi, dan beban peralatan elektronik yang sebenarnya merupakan beban DC.

2. Metode Penelitian

2.1. Model Sistem PV

Gambar 1 menyajikan model sederhana sistem PV dengan bus beban DC terhubung jala – jala utilitas dilengkapi dengan baterai sebagai penyimpan energi.



Gambar 1. Model sistem PV beban DC terhubung jala – jala AC utilitas

Komponen PLTS meliputi: *array* PV, *Baterai Charge Regulator* (BCR), Baterai, Beban DC dan konverter. *Array* PV berisi beberapa modul PV mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Energi listrik yang dibangkitkan *array* PV dalam bentuk arus searah sehingga dapat langsung terhubung ke beban DC. Komponen *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dan *Battery Charge Regulator* (BCR) berfungsi untuk mengatur aliran daya dari PV sehingga luaran daya PV berada pada titik daya maksimum, serta mengatur pengisian ke baterai sebagai penyimpan energi listrik. Koneksi dengan jala – jala utilitas dilakukan melalui konverter yang berfungsi merubah arus bolak balik menjadi arus searah yang dibutuhkan beban. Pada penelitian ini, jala – jala utilitas bertindak sebagai *back up*

sistem dan sistem PV diasumsikan tidak menjual energi listrik yang dihasilkan ke utilitas. Sistem menyuplai beban DC yang langsung terhubung ke bus DC. Sebuah konverter DC – DC dapat digunakan untuk mengubah level tegangan DC tertentu ke nilai tegangan DC lain yang lebih rendah atau lebih tinggi [9], jika tegangan kerja beban DC tidak sama dengan tegangan bus DC.

2.2 Beban Sistem PV

Sistem PV direncanakan menyuplai beban DC pada instalasi rumah tinggal sederhana. Beban DC berupa lampu penerangan menggunakan lampu LED dengan ukuran daya lampu disesuaikan dengan luas ruang dan kebutuhan tingkat pencahayaan (lux) ruangan mengacu pada standar yang berlaku, dan beban peralatan elektronik DC seperti: TV, laptop dan *handphone* diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Asumsi beban sistem PV

Beban Penerangan	Luas	Lux	Lumen	Daya	Pemakaian (jam)	Energi Harian (Wh)
Teras depan	18	60	1080	11	13	143
teras belakang	18	60	1080	11	13	143
ruang tamu	12	120	1440	13	6	78
ruang kerja	6	200	1200	13	5	65
kamar tidur 1	9	120	1080	11	6	66
kamar tidur 2	9	120	1080	11	6	66
kamar tidur 3	9	120	1080	11	6	66
Dapur	9	250	2250	18	7	126
ruang makan	9	120	1080	11	7	77
ruang keluarga	12	120	1440	13	7	91
kamar mandi	4	250	1000	11	7	77
Beban Peralatan Elektronik				Daya	Pemakaian (jam)	Energi Harian (Wh)
LED TV				50	12	600
Notebook				65	10	650
Smartphone				5	8	40
Total Kebutuhan Energi Harian (Wh)						2288

Dengan asumsi beban tersebut total kebutuhan energi harian yang digunakan sebagai dasar perencanaan sistem PV adalah sebesar 2.28 kWh per hari.

2.3 Resource sistem PV

Salah satu parameter dalam perencanaan sistem PV adalah *resource* sistem PV meliputi: radiasi matahari dan temperatur lingkungan. Data radiasi matahari menggunakan data sekunder yang diunduh dari *Nasa Surface Meteorology and Solar Energy Database* dengan memasukkan kordinat lokasi penelitian di Kalimantan, Blater Purbalingga dengan latitude 7.5° LS dan longitude 105.8° BT pada software HOMER. Tabel 2 menyajikan rata-rata radiasi matahari harian dan temperatur harian selama 1 tahun.

Tabel 2. Radiasi Matahari dan Temperatur Lingkungan pada Lokasi Sistem PV

Bulan	Clearness Index	Daily radiation (kwh/m2/day)	Temperatur (C)
Januari	0.402	4.33	25.32
Februari	0.418	4.52	25.4
Maret	0.436	4.58	25.57
April	0.476	4.65	25.6
Mei	0.517	4.61	25.32
Juni	0.525	4.43	24.86
Juli	0.539	4.65	24.54
Agustus	0.528	4.94	24.76
September	0.51	5.19	25.17
Oktober	0.466	4.96	25.43
November	0.416	4.46	25.29
Desember	0.43	4.6	25.22

Rata – rata radiasi matahari harian selama setahun adalah 4.66 kWh/m²/hari dengan radiasi terendah pada bulan Januari sebesar 4.33 kWh/m²/hari dan tertinggi pada bulan September sebesar 5.19 kWh/m²/hari.

2.4. Komponen Sistem PV

Sistem PV disimulasikan menggunakan model *generic flat plate PV* pada HOMER dengan *search space* kapasitas PV divariasikan antara 0.1 hingga 1.6 kWp. Sedangkan baterai menggunakan *kinetic battery model*. Gambar 2 memperlihatkan model *kinetik* baterai yang digunakan pada simulasi. Baterai berupa baterai *lead acid* dengan kapasitas 1 kWh dengan tegangan nominal 12 V. Tegangan bus DC dirancang menggunakan sistem 24 V sehingga susunan string baterai terdiri dari 2 seri baterai.

Masa hidup dari baterai umumnya dinyatakan dalam *life cycle* atau *energy throughput (lifetime throughput)*. *Energy throughput* adalah jumlah total energi yang dapat diharapkan untuk disimpan dan diberikan selama masa pakai baterai. Komponen baterai membutuhkan penggantian setelah sejumlah siklus energi mengalir melalui baterai. HOMER menggunakan *lifetime throughput* ini untuk menghitung masa pakai baterai penyimpanan (Homerenergy).

Sistem memakai konverter dengan efisiensi sebesar 95%. Perkiraan *life time* dari konverter dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, sebagai contoh suhu lingkungan yang tinggi berpengaruh mengurangi *lifetime*. Dengan teknologi sekarang, *lifetime* dari panel PV normalnya digaransi 20 – 25 tahun, sedangkan *lifetime* inverter biasanya dibatasi kurang dari 15 tahun [10]. Selama *lifetime* dari panel surya maka inverter harus diganti.

2.5 Parameter Ekonomi

Sistem PV yang dirancang diasumsikan memiliki usia pakai (*life time*) selama 25 tahun. Perencanaan sistem PV ini menggunakan beberapa parameter ekonomi terkait suku bunga, laju inflasi dan harga komponen yang digunakan pada sistem PV. *Interest rate* menggunakan nilai 4,25% mengacu pada data Badan Pusat Statistik. Sedangkan laju inflasi diasumsikan sebesar 3,4% mengacu pada data inflasi Bank Indonesia.

Harga Komponen sistem PV terhubung jala – jala listrik di Indonesia untuk 1kWp sistem panel surya yaitu: 1) Biaya invertasi panel surya kapasitas 1000 Wp rata – rata sebesar Rp. 12.250.000,- (47%), biaya konverter 1000 W sebesar Rp. 3.450.000,- dan komponen pelengkap lainnya membutuhkan investasi kurang lebih Rp. 10.000.000,- [11].

2.6. Grid Utilitas

Jala – jala utilitas berupa grid arus bolak – balik (AC) dari Perusahaan Listrik Negara (PLN). Harga pembelian energi listrik dari jala – jala adalah sebesar Rp. 1.342,- per kWh mengacu pada tarif dasar listrik PLN untuk kategori pelanggan rumah tangga (R1).

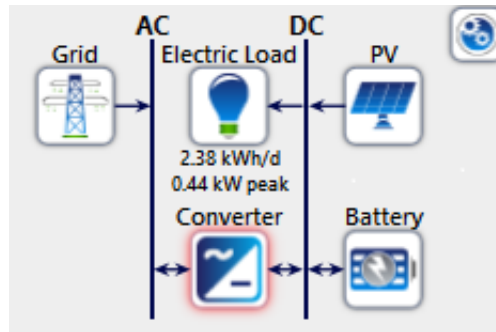
2.7. Simulasi Sistem PV

Model sistem PV yang diusulkan disimulasikan menggunakan software *HOMER Pro Microgrid Analysis Tool*. Simulasi dilakukan dengan memperhatikan beberapa kekangan yaitu: *maximum capacity shortage* sebesar 1% serta fraksi kontribusi energi terbarukan (*Renewable Energy Fraction*). Analisis sensitivitas dilakukan dengan variasi fraksi energi terbarukan yang 25% hingga 100%.

3. Hasil dan Analisis

3.1 Simulasi Sistem PV

Model sistem PV grid beban arus searah terhubung jala – jala utilitas yang diusulkan di atas disimulasikan menggunakan perangkat lunak *HOMER Pro Microgrid Analysis Tool* untuk menganalisis kondisi optimal sistem PV pada beberapa kekangan yang ditetapkan. Aspek yang dianalisis pada perencanaan ini meliputi: arsitektur sistem PV, biaya sistem, produksi dan utilisasi energi listrik pada sistem, dan kehandalan sistem. Gambar 3 menyajikan diagram skematik sistem pada HOMER.



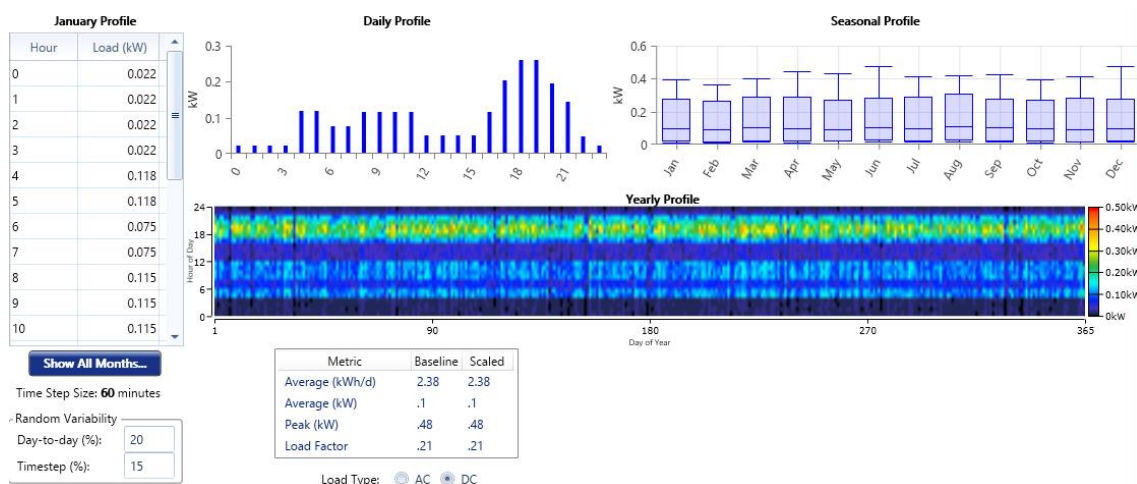
Gambar 3. Model sistem PV

Komponen modul PV, baterai dan beban terhubung ke bus DC. Sedangkan hubungan ke grid utilitas dilakukan melalui sebuah konverter. Parameter yang menjadi masukan komponen PV meliputi spesifikasi komponen, *lifetime*, dan biaya masing masing komponen. Tabel 3 menyajikan ringkasan variabel masukan komponen sistem PV di atas. Input biaya komponen PV diperhitungkan sebagai jumlah dari biaya investasi panel surya dan komponen pelengkap lainnya.

Tabel 3. Variabel masukan komponen sistem PV

Komponen	Keterangan	Lifetime	Biaya
PV	Generic flat plate PV kapasitas 0.1 - 1.6 kWp	25 tahun	Rp 22.500.000,- per kWp
Baterai	Generic 12V Lead Acid Battery with 1 kWh energy storage	Lifetime throughput 800 kWh	Rp 3.000.000, per buah
Konverter	System Converter dengan efisiensi 95%	10 tahun	Rp 3.500.000, per kW
Grid	Grid AC utilitas kapasitas 1.3 kW	-	Rp 1.342/kWh

Profil beban sistem PV selama 1 hari diperlihatkan pada Gambar 4 berikut dengan memasukan penggunaan beban setiap jam. Berban tertinggi berada pada jam 17.00 – 22.00. Dalam banyak kasus, dimana beban listrik adalah jumlah dari beberapa peralatan listrik dan penerangan, total listrik setiap saat dan setiap hari tidaklah sama atau bervariasi, oleh karena orang tidak menyalakan atau mematikan peralatan listrik pada saat yang sama setiap hari. Untuk membuat data beban lebih realistis digunakan nilai variabilitas beban acak atau random (Homerenergy). Pada penelitian ini digunakan *day to day variability* sebesar 20% dan nilai *timestep variability* 15% mengacu pada nilai variabilitas yang digunakan pada penelitian lain [12].



Gambar 4. Profil beban harian sistem PV

3.2. Arsitektur Sistem PV

Arsitektur sistem PV yang optimal berdasar hasil simulasi disajikan pada Tabel 4. Pada skenario (1), dimana energi terbarukan menyuplai 100% kebutuhan energi beban, arsitektur sistem PV berupa sistem *PV-battery stand alone* dengan kapasitas PV 1.1 kWp dan jumlah baterai 8 buah (8 kWh). Sistem tidak memerlukan konverter karena tidak *diback-up* oleh grid. Dapat dilihat pada sistem *stand alone* kebutuhan kapasitas PV dan baterai menjadi sangat besar, jika dibandingkan dengan pada skenario sistem PV terhubung dengan grid (skenario 2 – 4). Hal ini karena pada sistem *stand alone* memerlukan hari otonom yang tinggi untuk mengantisipasi ketidakpastian cuaca atau kondisi cuaca buruk dimana radiasi matahari kecil.

Tabel 4. Arsitektur sistem PV

Skenario	Renewable Fraction (%)	Arsitektur	PV (kW)	Baterai	Grid (kW)	Konverter (kW)
(1)	100	PV-Battery	1.1	8	-	-
(2)	25	PV-Grid	0.4	-	1.3	0.313
(3)	50	PV-Grid-Battery	0.4	2	1.3	0.274
(4)	75	PV-Grid-Battery	0.6	4	1.3	0.228

Koneksi sistem dengan grid utilitas pada arsitektur 2 sampai 4 mengurangi kebutuhan kapasitas sistem. Pada arsitektur (2) untuk memenuhi fraksi energi terbarukan sebesar 25% memungkinkan sistem PV tanpa dilengkapi baterai, dengan arsitektur yang paling optimal adalah menggunakan *array* PV kapasitas 0.4 kWp dengan tanpa menggunakan baterai. Semua energi listrik yang diproduksi oleh modul PV dimanfaatkan untuk menyuplai beban pada siang hari, sementara kebutuhan energi beban pada malam hari dipenuhi dari jala – jala.

Pada skenario (3) dan (4) dimana sistem PV diharapkan dapat memberikan kontribusi fraksi energi terbarukan sebesar 50% dan 75%, selain dukungan dari jala – jala utilitas, sistem PV juga dilengkapi baterai untuk penyimpanan energi listrik untuk mendapatkan hasil yang optimal. Kebutuhan konverter pada sistem PV terhubung grid adalah sebesar 0.22 – 0.30 kW untuk dapat memenuhi kebutuhan beban puncak sistem.

3.3. Produksi dan Utilisasi Energi Sistem PV

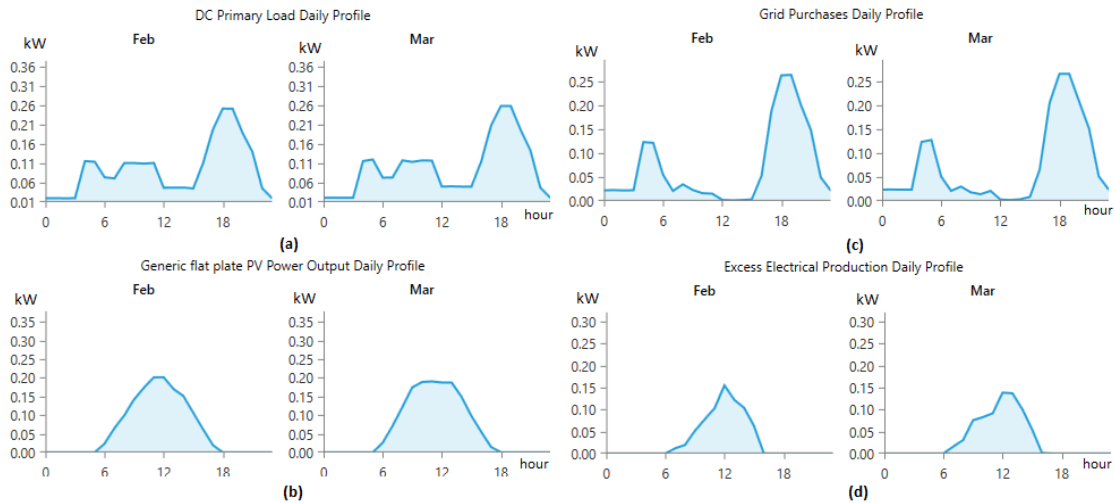
Produksi energi dan utilisasi energi sistem PV pada keempat arsitektur sistem yang diperoleh di atas diperlihatkan pada Tabel 5. Pada arsitektur (1) energi listrik yang diproduksi oleh modul PV banyak yang tidak dimanfaatkan untuk menyuplai kebutuhan beban. Oleh karena itu memunculkan *excess electricity* yang sangat tinggi sebesar 521 kWh/tahun (34.58%). Sistem PV arsitektur (1) memiliki kapasitas PV dan baterai yang besar sehingga pada kondisi cuaca baik dan radiasi matahari tinggi, baterai akan cenderung penuh dan kelebihan energi listrik dari modul PV tidak bisa lagi disimpan di baterai.

Tabel 5. Produksi dan utilisasi energi

No	Paramater	Arsitektur			
		PV - Battery	PV-Grid	PV-Battery-Grid	PV-Battery-Grid
		RE 100% (1)	RE 25% (2)	RE 50% (3)	RE 75% (4)
1	PV production (kWh/yr)	1507	548	548.27	822.40
2	Grid purchase (kWh)		623	404.61	179.62
3	Electricity production (kWh/yr)	1507	1171	952.88	1002.02
4	Electricity consumption (kWh/yr)	859	862	861.47	860.68
5	Excess electricity (kWh/yr)	521	278	20.85	37.37
6	Excess electricity (%)	34.58	23.73	2.19	3.73
7	Converter losses (kWh/yr)		31.10	25.40	8.98
8	Battery losses (kWh/yr)	132		33.00	97.40

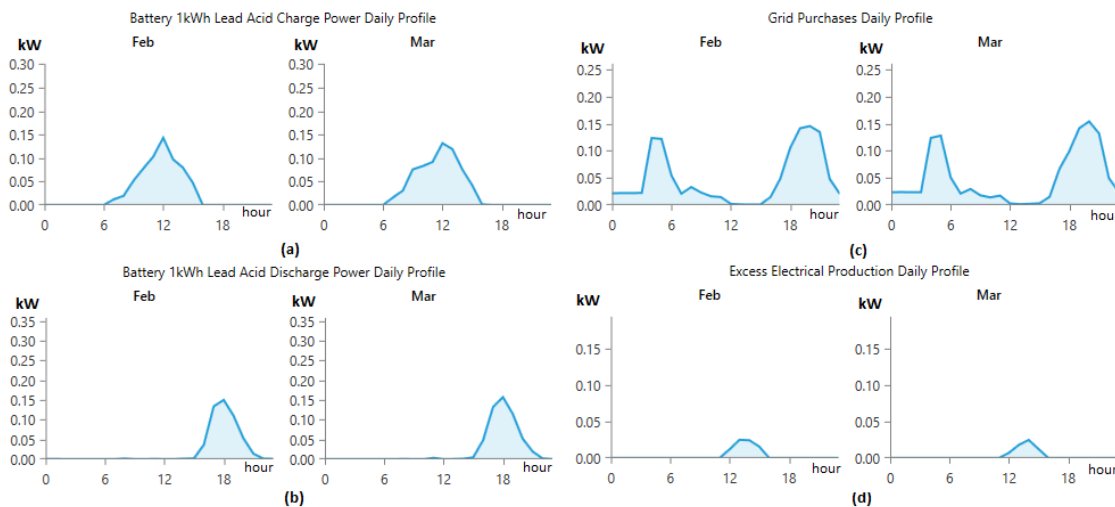
Pada arsitektur (2) sistem tidak dilengkapi baterai penyimpan berdampak pada nilai energi PV yang tidak dimanfaatkan sebagai *excess electricity* juga masih tinggi sebesar 278 kWh (23.73%). Gambar 5 memperlihatkan contoh profil energi listrik pada sistem PV arsitektur (2) pada bulan februari dan maret. Produksi energi dari modul PV tinggi pada siang hari. Kelebihan energi yang dihasilkan PV pada siang

hari tidak tersimpan, sehingga banyak potensi energi PV yang terbuang (Gambar 5d). Kebutuhan energi pada malam hari dan saat produksi PV rendah diambil dari jala – jala utilitas



Gambar 5. Profil harian energi sistem PV arsitektur 2 ; (a) beban, (b) produksi PV, (c) energi grid, (d) excess electricity

Sistem arsitektur (3) dan (4) memiliki nilai *excess electricity* terkecil sebesar 2.19% dan 3.73% menunjukkan utilisasi energi terbarukan pada kedua sistem tersebut sangat baik. Akan tetapi penambahan komponen baterai pada kedua arsitektur ini memberikan kontribusi rugi energi yang cukup signifikan karena komponen baterai *lead acid* memiliki efisiensi energi yang rendah. Gambar 6 menunjukkan profil harian energi sistem PV arsitektur 3.



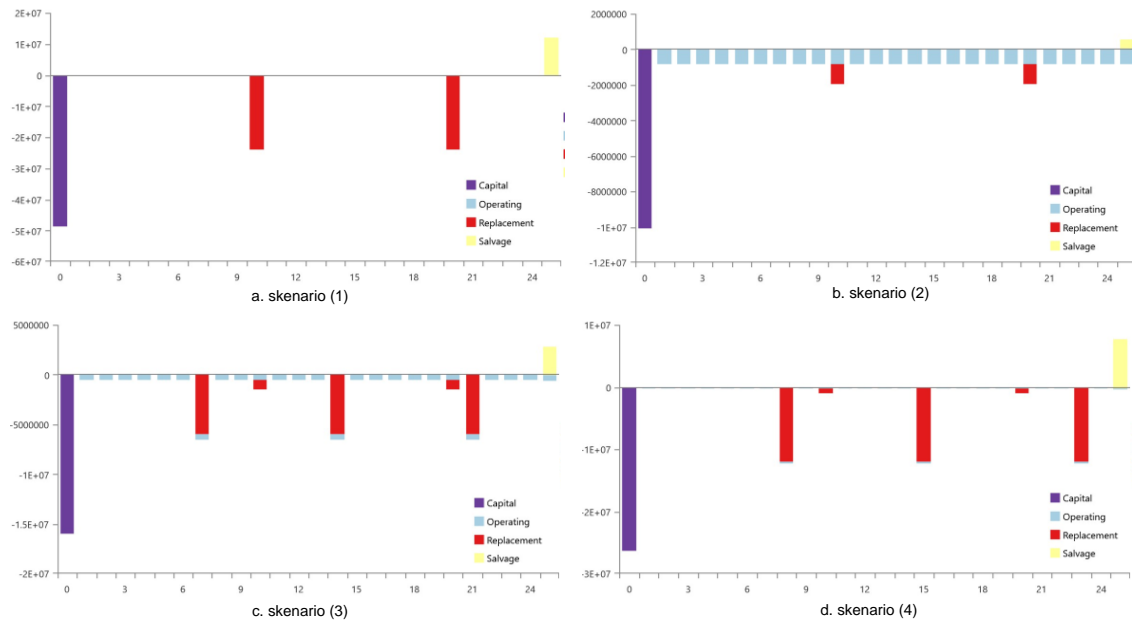
Gambar 6. Profil harian energi sistem PV arsitektur 3 ; (a) charge baterai, (b) discharge baterai, (c) energi grid, (d) excess electricity

Profil beban dan produksi PV untuk arsitektur (3) adalah sama dengan profil pada arsitektur (2) karena menggunakan kapasitas PV yang sama yaitu 0.4 kWp. Baterai melakukan pengisian pada saat energi dari PV berlebih pada siang hari (Gambar 6a) dan pengosongan pada malam hari (Gambar 6b) sehingga mengurangi pembelian energi listrik jala – jala pada malam hari. Pengisian baterai pada siang hari memanfaatkan kelebihan energi listrik yang dibangkitkan PV berdampak pada pengurangan *excess electricity* (Gambar 6d)

3.4. Biaya Sistem PV

Salah satu aspek yang sangat penting dalam perencanaan sistem PV adalah biaya sistem. Komponen biaya sistem meliputi: biaya *initial capital* dan biaya penggantian (*replacement*) komponen, serta biaya operasional dan pemeliharaan. Gambar 7 menyajikan *cash flow* biaya sistem PV yang

direncanakan. *Initial capital* meliputi investasi awal untuk pembelian semua komponen sistem. Biaya operasional dan pemeliharaan terdiri dari biaya pemeliharaan komponen dan biaya untuk membayar energi listrik yang dibeli dari jala-jala utilitas. Biaya penggantian diperlukan untuk mengganti komponen setelah *lifetime* terlewati. Komponen PV memiliki *lifetime* 25 tahun, sehingga selama masa proyek tidak mengalami penggantian. Konverter dengan perkiraan *lifetime* 10 tahun memerlukan *replacement* pada tahun ke 10 dan 20. Sedangkan *lifetime* dari baterai dipengaruhi oleh penggunaan energi (*energy throughput*) baterai. Perkiraan umur baterai pada skenario (1) adalah 10 tahun. Sedangkan pada skenario (3) dan (4) baterai diekpektasikan memiliki umur pakai selama 6.95 tahun dan 7.39 tahun.



Gambar 7. *Cashflow* biaya sistem pada keempat arsitektur

Biaya sistem PV keempat skenario dirangkum dalam Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Biaya Sistem PV

Skenario	Renewable Fraction (%)	Arsitektur	Initial capital (Rp juta)	Replacement cost (Rp juta)	Operating cost (Rp juta/yr)	NPC (Rp juta)	COE (Rp)
(1)	100	PV-Battery	48,75	43.10	0.12	81,83	4,179
(2)	25	PV-Grid	10,09	1.96	0.92	30,57	1,560
(3)	50	PV-Grid-Battery	15,95	18.01	1,22	43,95	2,239
(4)	75	PV-Grid-Battery	26,29	33.82	1,44	59,20	3,018

Secara keseluruhan, sistem arsitektur (2) memiliki biaya terendah baik dari sisi investasi yang harus dikeluarkan, aspek operasional dan harga energi sistem. Biaya operasi Sistem PV dengan baterai (arsitektur 1, 3 dan 4) relatif tinggi meskipun kebutuhan untuk membayar energi listrik yang dibeli dari utilitas lebih rendah. Tingginya biaya operasi ini disebabkan oleh kebutuhan untuk penggantian baterai saat usia pakai baterai sudah habis. Faktor lain yang berpengaruh pada rendahnya biaya sistem PV arsitektur (2) adalah harga energi dari sistem PV yang lebih tinggi dari harga energi jala – jala utilitas karena harga modul PV, komponen pendukung dan baterai yang mahal. Porsi kontribusi energi terbarukan PV yang lebih rendah artinya lebih banyak energi listrik yang dibeli dari jala – jala utilitas.

3.5 Kehandalan Sistem

Karakteristik sumber daya energi terbarukan yang bersifat *intermittent*, mempengaruhi produksi energi dari pembangkit. Analisis kehandalan diperlukan dalam perencanaan sistem. Beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghitung kehandalan sebuah sistem hibrida energi terbarukan antara lain: *Lost of Load Probability (LOLP)*, *Loss of Power Supply Probability (LPSP)*, *unmet load* [13] dan *capacity shortage*. Pada penelitian ini digunakan dua parameter kehandalan sistem yaitu: *capacity*

shortage (CS) dan *unmet load* (UL) guna menganalisis kehandalan sistem PV yang diusulkan. *Capacity shortage* menunjukkan kekurangan yang terjadi antara kapasitas operasi yang diperlukan dan jumlah dari kapasitas operasi sebenarnya yang dapat diberikan oleh sistem. Sedangkan parameter *unmet load* menyatakan jumlah total beban yang tidak dapat terlayani oleh sistem karena permintaan listrik (*demand*) melebihi pasokan [14]. Kehandalan tertinggi adalah jika tidak terjadi *capacity shortage* dan *unmet load* (nilai CS dan UL sama dengan 0%). Akan tetapi untuk mendapatkan nilai tersebut diperlukan kapasitas sistem yang sangat besar sehingga menjadi sangat mahal. Sistem dengan *Maximum Annual Capacity Shortage* 1% merupakan saran yang masuk akal dalam hal pertimbangan biaya dan kehandalan [15].

Tabel 7. *Unmet load* dan *capacity shortage* sistem PV

Skenario	Renewable Fraction (%)	Arsitektur	Unmet load (kWh/yr)	Unmet load (%)	Capacity Shortage (kWh/yr)	Capacity Shortage (%)
(1)	100	PV-Battery	8.87	1.02	9.43	1.09
(2)	25	PV-Grid	5.74	0.66	8.94	1.03
(3)	50	PV-Grid-Battery	6.50	0.75	9.14	1.05
(4)	75	PV-Grid-Battery	7.29	0.84	9.46	1.09

Parameter kehandalan sistem PV disajikan dalam Tabel 7. Secara keseluruhan rancangan sistem PV yang diusulkan memiliki tingkat kehandalan yang baik dengan nilai *unmet load* di bawah 1 % dan *capacity shortage* 1%.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menyajikan model sistem PV beban arus searah terhubung jala – jala arus bolak – balik pada instalasi rumah tinggal. Sistem yang diusulkan tersusun atas : *array photovoltaic*, baterai dan beban DC yang terhubung ke bus DC serta terkoneksi ke jala – jala utilitas melalui sebuah konverter. Analisis optimal sistem PV dilakukan untuk mendapatkan arsitektur sistem PV yang mampu memenuhi kebutuhan beban dengan tingkat kehandalan baik pada *capacity shortage* 1% dengan memperhatikan fraksi energi terbarukan. Berdasarkan hasil simulasi, biaya energi (*cost of energy*) semakin tinggi pada skenario fraksi energi terbarukan yang lebih tinggi disebabkan faktor harga modul PV dan komponen penunjangnya yang masih mahal. Biaya terendah sistem diperoleh pada konfigurasi sistem PV terhubung jala – jala utilitas tanpa baterai dengan fraksi energi terbarukan rendah. Penggunaan baterai selain menambah biaya juga meningkatkan losses sistem PV. Akan tetapi penambahan komponen baterai dapat meminimalkan *excess electricity* sistem sehingga utilisasi energi terbarukan yang diproduksi PV menjadi optimal.

Daftar Pustaka

- [1] Balfour J., Shaw M., Nash N. B. (2011). Introduction to Photovoltaic System Design. USA : Jones & Bartlett Publishers.
- [2] Ishaq M., Ibrahim U.H., Abubakar, H. (2013). Design Of An Off Grid Photovoltaic System: A Case Study Of Government Technical College, Wudil, Kano State. International Journal of Scientific & Technology Research Volume 2, Issue 12, December 2013
- [3] Wang C., Chen W., Shao S., Chen Z., Zhu B., Li Z. (2011) Energy Management of Stand-Alone Hybrid PV System, Energy Procedia, Volume 12, 2011, Pages 471-479.
- [4] Kouro S., Leon J. I., Vinnikov D. and Franquelo L. G. (2015). Grid-Connected Photovoltaic Systems: An Overview of Recent Research and Emerging PV Converter Technology. IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 9, no. 1, pp. 47-61, March 2015.
- [5] Mahela O. P., Shaik A. G. (2017) Comprehensive overview of grid interfaced solar photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 68, Part 1, 2017.
- [6] Iltawil M. A., Zhao Z. (2010), Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 112–129.
- [7] Ekici S., Kopru M. A. (2017). Investigation of PV System Cable Losses. International Journal of Renewable Energy Research Vol.7, No.2, 2017

-
- [8] Ayai N., Hisada T., Shibata T., Miyoshi H., Iwasaki T., Kitayama K., (2012, April 8). DC Micro Grid System. SEI Technical Review Number 75 October 2012. Retrieved from <http://global-sei.com/technology/tr/bn75/pdf/75-25.pdf>
- [9] Suroso, Winasis, Azis, A.N., Siregar, D.A. DC-DC Power Converter of 24/320 Volts with Microcontroller Based Proportional Integral Voltage Controller. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol.13, Issue 8, 2018.
- [10] Sangwongwanich A., Yang Y., Sera D., Blabjerg F. (2017) Lifetime Evaluation of Grid Connected PV Inverters Considering Panel Degradation Rates and Installation Sites. *IEEE Transactions on Power Electronics* Vol PP No 99 2017.
- [11] Janaloka. (2019, April 8). Bagaimana Menghitung Biaya 15 Juta untuk 1 kWp Sistem Panel Surya? Retrieved from <https://janaloka.com/bagaimana-menghitung-biaya-15-juta-untuk-1-kwp/>
- [12] Abdilahi A.M., Yatim A.H.M, Mustafa M.W., Khalaf O.T., Shumran A.F., Nor F.M. (2014). Feasibility Study of Renewable Energy-Based Microgrid System in Somaliland Urban Centers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40 (2014) 1048 - 1059
- [13] Kaldellis J.K. (2010). Stand-alone and Wind Hybrid Energy Systems Technology, Energy Storage and Application. CRC Press
- [14] Homer Energy (2018, Desember 12). Load Variability. Retrieved from <http://usersupport.homerenergy.com/customer/en/portal/articles/2188741-load-variability>
- [15] Mohammadi M., Ghasempour R., Astarai F.R., Ahmadi E., Aligholian A., Toopsekhan A. (2018). Optimal planning of Renewable Energy Resource for Residential House Considering Economic and Reliability Criteria. *Electrical Power and energy Systems* 98 (2018) 261 – 273