

Analisis Teknis dan Ekonomis Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-grid Menggunakan Software PVSyst untuk Usaha Mikro Kecil dan Menengah (UMKM) Coffeeshop Remote Area

Jaka Windarta^{1,2*}, Susatyo Handoko², Khilmi Nafadinanto Irfani², Sunan Muqtasida Masfuha²,
Candra Halim Itsnareno²

¹ Magister Energi Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro,

² Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

Abstrak

Distribusi listrik dari Perusahaan Listrik Negara (PLN) belum tentu mencapai daerah-daerah terpencil, sehingga daerah tersebut memerlukan sumber listrik alternatif seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Penelitian kali ini memiliki tujuan untuk merancang dan menganalisis PLTS Off-grid skala kecil dengan studi kasus UMKM Coffeeshop ditinjau dari analisis teknis dan ekonomi. Metode penelitian yang digunakan adalah dengan melakukan perbandingan dengan menggunakan desain 2 merk panel surya kapasitas 720Wp dan 2 merk baterai kapasitas 160Ah menggunakan software PVSyst 7.0. Dari hasil simulasi didapatkan jumlah energi tersuplai paling banyak pada variasi 3 sebesar 674,51 kWh/tahun. Selain itu dilakukan analisis ekonomi dengan tujuan untuk membandingkan sisi ekonomis PLTS dengan alternatif sumber listrik lain seperti genset dan penggunaan baterai dengan charging dari PLN. Berdasarkan simulasi software RetScreen, nilai Net Present Value (NPV) pada semua variasi diperoleh nilai negatif (< 0), akan tetapi penggunaan PLTS off-grid adalah yang paling menguntungkan jika dibandingkan dengan penggunaan genset atau sumber listrik baterai dengan pengisian daya dari PLN.

Kata kunci: PLTS; off-grid; remote area; PVSyst; RetScreen

Abstract

[Title: Technical and economical analysis of off-grid solar power plant using pvsyst software for micro small and medium enterprise (msme) coffeeshop remote area] The distribution of electricity from PLN certainly reaches remote areas, so these areas require alternative sources of electricity such as solar power plants. This study aims to design and analyze the potential of small-scale off-grid PV mini-grid in terms of engineering and economics. The research method used is a simulation on PVSyst 7.0 software with four variations of the main components, namely solar panels and batteries. The research results were obtained based on four variations made, namely a 720Wp panel, a 24V 150Ah battery, and an 800W inverter. This design will produce electrical energy of approximately 2 kWh/kWp/day. The purpose of the economic analysis is to compare the economic side of PLTS with other alternative sources of electricity such as generators and the use of batteries with charging from PLN. Based on the RetScreen simulation software, the NPV values for all variations were negative (< 0). Thus all systems are considered economically unfeasible and do not provide benefits. However, the PLTS Off-Grid option is the most profitable compared to generators or battery power sources with PLN charging.

Keywords: solar power plant; off-grid system; remote area; PVSyst; RetScreen

*) Penulis Korespondensi.

E-mail: jakawindarta@lecturer.undip.ac.id

1. Pendahuluan

Pertumbuhan permintaan listrik diproyeksikan akan mengalami peningkatan hingga 9 kali lipat dari semula 254,6 TWh saat 2018 menjadi 1.918 TWh pada 2050. Selama periode 2018-2050 permintaan energi

listrik mencatatkan laju peningkatan sebesar 6,5% per tahun, dan memiliki pola yang relatif sama. Porsi permintaan listrik terbesar ada pada sektor rumah tangga, lalu pada industri dan diikuti komersil, transportasi, dan sektor lainnya. Potensi energi baru terbarukan Indonesia yang cukup besar ditargetkan dapat memenuhi rencana bauran energi primer tersebut (Dewan Energi Nasional, 2019). Dengan tingkat radiasi rata-rata/hari di Indonesia yang mencapai 4,80 KWp/m²/hari, dimana ini merupakan kategori yang relatif tinggi menjadikan energi surya pilihan potensial terbaik yang dapat dimanfaatkan hingga skala rumah tangga (kecil). PLTS merupakan pembangkit listrik yang fungsional dan fleksibel sehingga dapat mudah diaplikasikan pada tempat-tempat dengan paparan sinar matahari yang cukup. PLTS dapat dengan mudah diaplikasikan pada atap konstruksi rumah, caravan, bus, atau bahkan mobil tanpa mengganggu kegiatan produksi dan lingkungan sekitar.

Atas dasar tersebut penggunaan PLTS merupakan langkah strategis yang dapat dilakukan untuk alternatif penggunaan listrik pada UMKM yang berada pada remote area tanpa jangkauan listrik. Dengan memanfaatkan ruang yang ada, penggunaan panel surya PLTS menjadi salah satu pilihan pemanfaatan energi terbarukan yang ramah lingkungan pada skala kecil (UMKM). Penggunaan energi terbarukan ini akan berkontribusi menurunkan efek pemanasan global walaupun belum terlalu signifikan.

2. Bahan dan Metode

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya atau PLTS merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan sumber energi sinar matahari. PLTS menggunakan sel surya pada panel untuk mengubah energi radiasi yang diperoleh dari sinar matahari atau foton dan mengubahnya menjadi energi listrik. Lapisan silikon murni dan bahan semikonduktor merupakan penyusun utama dari panel surya. PLTS termasuk pembangkit ramah lingkungan, tidak menghasilkan polusi maupun limbah berbahaya bagi lingkungan. Radiasi matahari, suhu sel surya, orientasi panel surya, dan shadow leverages merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi daya keluaran sel surya (Ramadhani, 2018).

2.2 Analisis Teknis

Analisis teknis dilakukan berdasarkan kapasitas PLTS yang dirancang, pemanfaatan dan penentuan spesifikasi komponen, orientasi panel, serta daya yang dihasilkan. Daya dihasilkan PLTS dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain radiasi sinar matahari di UMKM *Coffeeshop*, kemiringan panel surya dan arahnya, sinar matahari, suhu, dan kinerja teknis masing-masing komponen yang digunakan (Shrivastava dkk., 2021). Untuk menentukan kelayakan teknis PLTS

menggunakan rasio performa yang ditunjukkan dalam nilai prosentase. Nilai ini membandingkan total daya yang dapat dihasilkan sistem serta nilai rugi-rugi energi dengan nilai pada saat sistem PLTS beroperasi saat kondisi *standart test condition* (STC) (Ma dkk., 2017). Rugi-rugi pada sistem pembangkit listrik tenaga surya tergantung oleh efisiensi spesifikasi panel, suhu, dan efisiensi spesifikasi *inverter* (Pujawan, 2009).

2.3 Analisis Ekonomi Teknik

Analisis ekonomi teknik bertujuan untuk menilai kelayakan investasi suatu proyek dengan mengkaji alternatif-alternatif paling menguntungkan. Nilai investasi teknik memiliki umur ekonomis dalam satuan tahun. Sejalan dengan hal itu, nilai mata uang berfluktuasi dari waktu ke waktu sehingga memiliki nilai yang tidak sama. Oleh karenanya dibutuhkan proses ekuivalensi nilai mata uang (Bagaskoro dkk., 2019)

Untuk analisis ekonomi teknik digunakan persamaan 1-3 untuk membantu dalam perhitungan.

$$PWB = \sum_{t=0}^n Cb_t(FBP)_t \quad (1)$$

$$PWC = \sum_{t=0}^n Cc_t(FBP)_t \quad (2)$$

$$NPV = PWB - PWC \quad (3)$$

Dimana Cb adalah *Cash flow benefit*, Cc adalah *Cash flow cost*, FBP adalah Faktor Bunga *Present*, t adalah periode waktu, dan n adalah umur investasi. Dengan PWB merupakan *Present Worth Benefit*, kemudian PWC adalah nilai *Present Worth Cost*, dan NPV adalah nilai *Net Present Value*.

2.4 Metode penelitian

Penelitian ini menggunakan alat bantu *software* PVSyst untuk menganalisis secara teknis dan *software* RetScreen untuk menganalisis secara ekonomis. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

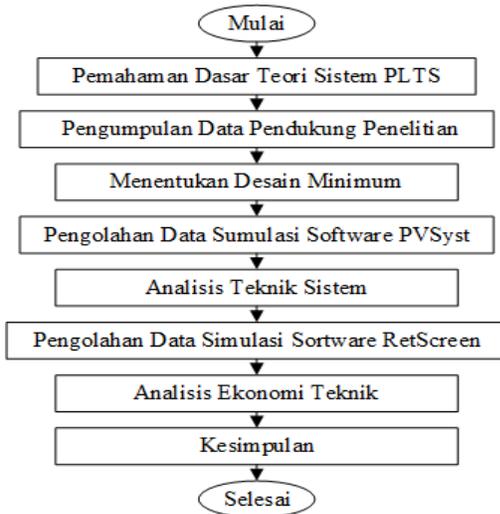
Pada Gambar 1 dijelaskan metodologi penelitian, dimulai dari (1) pendalaman teori tentang PLTS, (2) pengambilan data pada UMKM *Coffeeshop*, (3) merancang spesifikasi minimum sistem PLTS, (4) melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak PVSyst, (5) menganalisis secara teknis sistem yang telah dirancang, (6) melakukan analisis ekonomi menggunakan perangkat lunak retscreen, (7) pemilihan sistem terbaik dari segi analisis teknis dan ekonomis untuk diaplikasikan, (8) simpulan dari hasil penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Profil beban harian pada UMKM *Coffeeshop*

Lokasi yang dijadikan penelitian adalah Angka Coffee, Tembalang secara astronomis terletak pada koordinat -7.068564888359462, 110.44029635468642. Lokasi UMKM *Coffeeshop* terlihat pada Gambar 2.

Berdasarkan hasil survey lokasi secara langsung didapatkan data penggunaan beban pada Tabel 1. Berdasarkan Tabel 1 data profil beban harian dapat



Gambar 1. Diagram alir penelitian

direpresentasikan dalam bentuk grafik dengan parameter per jam seperti pada Gambar 3.

3.2 Iradiasi pada UMKM Coffeeshop

Data iradiasi pada lokasi UMKM Coffeeshop ditunjukkan pada Tabel 2 (The Joint Research Centre, 2021).

3.2 Jenis Sistem

Sistem PLTS yang akan digunakan pada UMKM Coffeeshop adalah sistem off-grid dengan mempertimbangkan pengguna UMKM yang memiliki mobilitas tinggi menggunakan caravan.

3.3 Rancangan sistem

Baterai (Louie, 2018) yang akan digunakan menggunakan sistem 24V dengan DoD 50%. Daya baterai dihitung menggunakan persamaan 4, sedangkan kebutuhan baterai dihitung menggunakan persamaan 5.

Daya baterai:

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Beban harian (Wh)}}{\text{Ef.inverter (\%)} \times \text{Teg.Baterai (V)}} \quad (4) \\
 &= 1892 / 0,95 \times 24 \\
 &= 82 \text{ Ah}
 \end{aligned}$$

Tabel 1. Data profil beban harian pada UMKM Coffeeshop

No.	Alat Elektronik	Jumlah	Daya (Watt)	Total Daya (Watt)	Total (Wh)
1	Pemanas air	1	300	300	2
2	Grinder Kopi	1	140	140	2
3	Router	1	15	15	15
4	Lampu A	8	6	48	8
5	Lampu B	1	13	13	6
6	Lampu C	1	3	3	10
7	Kipas angin	3	30	90	4
8	Speaker	1	20	20	3
Total				629	



Gambar 2. UMKM Coffeeshop UMKM Coffeeshop “Angka Coffe”

Kebutuhan baterai:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Hari otonom} \times \text{Beban bat.} \times \frac{1}{\text{DoD}} \quad (5) \\
 &= 1 \times 83 \times 1/0,5 \\
 &= 164 \text{ Ah}
 \end{aligned}$$

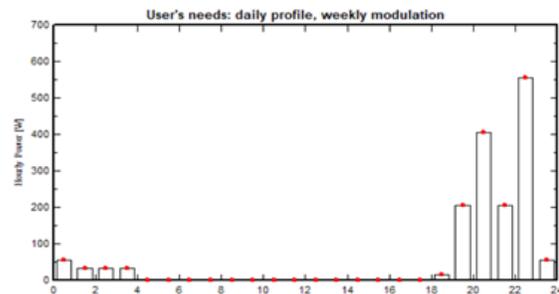
Adapun untuk panel surya (Louie, 2018), pada UMKM Coffeeshop dirancang untuk efektivitas penyinaran paling rendah 3,08 jam. Daya panel dihitung menggunakan Persamaan 6.

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Beban harian (Wh)}}{\text{Jam penyinaran (h)} \times \text{Ef.inverter}} \quad (6) \\
 &= 1892/3,08 \times 0,95 \\
 &= 646 \text{ Wp}
 \end{aligned}$$

Kapasitas minimum yang dibutuhkan pada perancangan adalah baterai 24V 160Ah, panel surya 646 Wp. Pada simulasi akan digunakan baterai 12V 160Ah x 2 buah dan 12V 80Ah x 4 buah, kemudian panel surya sebesar 120 Wp x 6 buah, dan 360 Wp x 2 buah.

3.4 Perbandingan Komponen Utama PLTS

Pada perancangan PLTS ini ada 4 komponen utama yang akan dipertimbangkan dalam merancang sistem PLTS off-grid, diantaranya adalah panel surya, baterai, inverter, dan solar charge controller. Komponen yang akan dikombinasikan adalah panel surya dengan baterai dengan konfigurasi sesuai pada Tabel 3.



Gambar 3. Grafik penggunaan beban harian pada UMKM Coffeeshop

Tabel 2. Iradiasi pada UMKM *Coffeeshop*

Bulan	Iradiasi Efektif (kWh/m ² /hari)	Suhu (°C)	Kec. Angin (m/s)
Januari	3,12	25.2	2.59
Februari	3,97	25.2	1.42
Maret	3,85	24.9	2.06
April	5,18	25.7	1.76
Mei	4,90	25.2	2.65
Juni	6,09	23.9	2.82
Juli	6,34	235	3.04
Agustus	6,14	23.9	3.11
September	5,96	25.3	2.99
Oktober	5,35	26.7	2.75
November	3,76	27.0	2.37
Desember	3,08	26.3	1.42

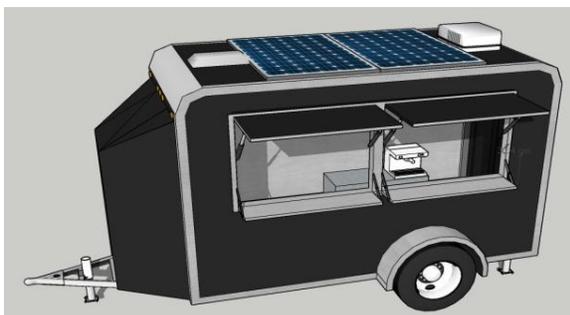
3.5 Simulasi

Dalam melakukan simulasi perancangan PLTS Studi Kasus Angka Coffee menggunakan perangkat lunak PVSyst (Shrivastava dkk., 2021), dibutuhkan data-data teknis yang akan berpengaruh pada hasil simulasi dengan menggunakan perangkat lunak. Beberapa faktor yang akan mempengaruhi output/hasil simulasi PLTS diantaranya adalah potensi matahari, nilai iradiasi, temperatur lokasi, kecepatan angin, posisi dan orientasi panel surya, spesifikasi komponen, serta data beban harian pada objek pemasangan. Pada simulasi juga akan ditampilkan besaran daya listrik yang diproduksi, besar daya listrik yang dialirkan ke beban pada lokasi, serta rugi-rugi sistem. Perancangan akan dilakukan menggunakan tipe penyangga tetap di atas atap caravan seperti pada Gambar 4.

3.6 Hasil Simulasi

Setelah menginput seluruh data yang dibutuhkan pada simulasi perancangan PLTS ini, simulasi pada PVSyst dapat dijalankan. Hasil simulasi PLTS pada UMKM *Coffeeshop* Angka didapatkan hasil pada Tabel 4.

Tabel 4 menunjukkan variasi 1 menghasilkan jumlah produksi energi tahunan (*E_avail*) sebesar 1022 kWh, tingkat pemenuhan energi (*solfrac*) 99,9%, energi yang dapat digunakan pengguna (*E_User*) sebesar 674,12



Gambar 4. Visualisasi objek penelitian

Tabel 3. Alternatif konfigurasi komponen PLTS

Variasi	Panel Surya	Baterai
1	6 modul seri-paralel Sunasia 120Wp	2 baterai seri Inpowers 12V 160Ah
2	6 modul seri-paralel Sunasia 120Wp	4 baterai seri-paralel Kijo 12V 80 Ah
3	2 modul paralel Canadian 360 Wp	2 baterai seri Inpowers 12V 160Ah
4	2 modul paralel Canadian 360 Wp	4 baterai seri-paralel Kijo 12V 80 Ah

kWh, dan *performance ratio* (PR) 0,502. variasi 2 menghasilkan jumlah produksi energi tahunan (*E_avail*) sebesar 1022 kWh, tingkat pemenuhan energi (*solfrac*) 99,7%, energi yang dapat digunakan pengguna (*E_User*) sebesar 672,9 kWh, dan *performance ratio*(PR) 0,501. variasi 3 menghasilkan jumlah produksi energi tahunan (*E_avail*) sebesar 1084 kWh, tingkat pemenuhan energi (*solfrac*) 100%, energi yang dapat digunakan pengguna (*E_User*) sebesar 674,51 kWh, dan *performance ratio*(PR) 0,502. variasi 4 menghasilkan jumlah produksi energi tahunan (*E_avail*) sebesar 1084 kWh, tingkat pemenuhan energi (*solfrac*) 99,9%, energi yang dapat digunakan pengguna (*E_User*) sebesar 674,24 kWh, dan *performance ratio*(PR) 0,502.

3.7 Analisis Teknis

Berdasarkan data yang didapat pada Tabel 4, jumlah energi listrik yang diproduksi panel surya pada Variasi 1 dan 2 adalah 1022 kWh/Tahun, sedangkan pada simulasi dengan Variasi 3 dan 4 jumlah energi listrik yang dihasilkan adalah 1084 kWh/Tahun. Nilai energi STC memiliki perbedaan yang diakibatkan dari perbedaan luas permukaan serta perbedaan efisiensi dari masing-masing panel surya, pada sistem PLTS variasi 1 dan 2 digunakan panel surya merk Sunasia (120Wp x 6) yang memiliki efisiensi sebesar 17% dan luas area 3,6 m². Kemudian pada sistem PLTS variasi 3 dan 4 menggunakan panel surya merk Canadian Solar (360Wp x 2) yang memiliki efisiensi sebesar 18,5% dan luas 4 m². Sehingga dapat disimpulkan semakin besar luasan permukaan panel dan semakin besar efisiensi memiliki efek yang semakin baik (King dkk., 2002). Efisiensi juga dipengaruhi oleh tipe panel surya yang digunakan. Jenis panel surya *monocrystalline* menggunakan bahan silikon yang lebih besar konsentrasinya dibanding dengan tipe *polycrystalline*. Hal ini berpengaruh pada efisiensi panel yang lebih besar pada jenis *monocrystalline*. Kemudian untuk spesifikasi sama pada nominal daya (Wp), jenis *monocrystalline* memiliki luasan permukaan panel yang lebih sedikit jika dibanding jenis *polycrystalline* (Harrouni, 2008).

Jumlah energi yang dapat tersuplai ke pengguna pada variasi 1 sebesar 674,12 kWh, variasi 2 sebesar 672,9 kWh, variasi 3 sebesar 674,51 kWh dan pada

variasi 4 sebesar 674,24 kWh. Terdapat sedikit perbedaan energi yang dapat disuplai sistem ke pengguna. Ini disebabkan karena baterai yang digunakan memiliki spesifikasi yang sama, sehingga perbedaan energi listrik yang dapat disuplai memiliki nilai yang relatif sama. Jumlah energi tersuplai terbesar ada pada Variasi 3 yaitu sebesar 674,51 kWh.

Tingkat pemenuhan energi pada variasi 1 sebesar 99,9%, pada variasi 2 sebesar 99,7%, pada variasi 3 sebesar 100%, pada variasi 4 sebesar 99,9%. Tingkat pemenuhan energi paling besar terdapat pada variasi 3 yaitu sebesar 100%. Nilai ini berpengaruh (berbanding terbalik) terhadap jumlah kekurangan energi listrik (E_{miss}). Semakin besar tingkat pemenuhan energi semakin kecil nilai kekurangan energi, maka dari itu tingkat pemenuhan energi 100% berarti sistem PLTS dapat menyuplai seluruh kebutuhan beban pengguna tanpa kekurangan energi yang signifikan.

PR ratio pada setiap variasi memiliki nilai yang tidak jauh berbeda. Pada variasi 1 sebesar 0,501. Pada variasi 2 sebesar 0,501. Pada variasi 3 sebesar 0,502. Kemudian pada variasi 4 sebesar 0,502. Rasio performa sistem PLTS memiliki nilai yang dapat dikategorikan cukup (Rajashekar & Naganagouda, 2018). Nilai performa rasio untuk sistem *off-grid* berskisar antara 0,4 hingga 0,6.

Pada seluruh variasi sistem PLTS, terdapat energi tidak terpakai (E_{unused}) yang cukup signifikan, hal ini disebabkan karena panel surya yang digunakan mengacu pada tingkat penyinaran terendah (3,08 kWh/m²/day) pada bulan Desember. Selain itu, hal ini juga disebabkan karena kapasitas baterai yang telah terisi penuh.

3.8 Analisis Ekonomi

Sistem yang akan dirancang pada UMKM *Coffeeshop*, akan ditinjau kelayakan ekonomi dan dipilih sesuai dengan hasil perhitungan nilai *Net Present Value* (NPV). Biaya total investasi, biaya penghematan energi listrik, biaya operasional, *discount rate*, dan nilai inflasi akan mempengaruhi hasil simulasi. Sebelum menentukan total biaya investasi, peneliti melakukan survei baik pada toko *offline* di area Kota Semarang, maupun pada toko *online* di berbagai *e-commerce* di Indonesia. Hal yang berpengaruh lainnya adalah nilai *discount rate* dan nilai inflasi yang peneliti dapatkan melalui laman resmi Bank Indonesia (Bank Indonesia, 2021).

UMKM *Coffeeshop* ini adalah remote area, alternatif sumber listrik yang memungkinkan sebagai suplai adalah PLTS, Genset, dan Penggunaan baterai dengan charging dari listrik PLN. Penelitian ini akan membandingkan tiga alternatif ini dari sisi ekonomisnya.

A. PLTS

Biaya investasi untuk masing-masing komponen pada perancangan sistem PLTS dapat dilihat pada Tabel 5. Berdasarkan Tabel 5 biaya investasi untuk variasi 1 sebesar Rp 17.550.000, variasi 2 sebesar Rp 18.550.000, variasi 3 sebesar Rp 17.550.000, sedangkan variasi 4 sebesar Rp 18.550.000.

Selama operasional PLTS, dibutuhkan biaya operasional dan pemeliharaan untuk sistem PLTS. Nilai ini didefinisikan sebesar 1-2% dari total biaya investasi awal sistem PLTS, kemudian ditambah biaya penggantian baterai selama masa proyek (Windarta, dkk., 2019), sehingga biaya operasional per tahun yang dibutuhkan sistem PLTS variasi 1, variasi 2, variasi 3, dan variasi 4 ditunjukkan pada Tabel 6.

Penghematan energi listrik merupakan perhitungan penghematan secara linier dari awal hingga akhir proyek PLTS dijalankan. Penghematan energi listrik diperoleh dari jumlah energi yang disuplai ke beban untuk memenuhi kebutuhan energi listrik sehari-hari UMKM *Coffeeshop*. Penghematan energi listrik yang dihasilkan sistem PLTS variasi 1, variasi 2, variasi 3, dan variasi 4 setiap tahun dapat dilihat pada Tabel 7.

Berdasarkan hasil simulasi pada *software* RetScreen didapatkan nilai NPV pada setiap rancangan variasi sistem PLTS sesuai dengan Tabel 8. Nilai NPV juga dapat dihitung menggunakan Persamaan 1-3.

Pada Tabel 9 ditunjukkan nilai NPV setiap Rancangan variasi sistem PLTS memiliki nilai negatif atau kurang dari 0. Sehingga didapatkan kesimpulan bahwa investasi PLTS untuk masing-masing variasi tidak layak secara ekonomis jika hanya mengacu pada nilai negatif NPV

B. Genset

Genset yang digunakan sesuai data beban di UMKM *Coffeeshop* adalah genset dengan daya 1KVA. Tabel 10 menunjukkan biaya investasi penggunaan genset. Berdasarkan dari hasil perhitungan dengan Persamaan 4.

$$S = K \times P \times T \quad (7)$$

dimana S adalah bahan bakar yang diperlukan per hari (liter), K merupakan faktor ketetapan penggunaan bahan bakar per kilowatt per jam (sebesar 0.21), P adalah daya genset (KVA), dan T adalah waktu (jam).

Didapatkan penggunaan bahan bakar dalam sehari sebanyak 2,1 liter (Badaruddin, 2015). Harga bensin saat ini adalah Rp7.650. Konsumsi bahan bakar dalam sehari sebesar Rp16.000 dan dalam setahun mencapai Rp5.622.750. Sehingga biaya untuk operasional penggunaan genset per tahun dapat ditunjukkan dalam Tabel 11.

Tabel 4 Hasil simulasi PLTS

Variasi	Bulan	Balances and result								
		GlobHor kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	E_Avail kWh	EUnused kWh	E_Miss kWh	E_User kWh	E_Load kWh	SolFrac ratio	PR ratio
Variasi 1	Januari	124,1	120,5	68,6	11,87	0,000	52,70	52,70	1,000	0,590
	Februari	137,4	131,2	75,8	19,62	0,000	52,64	52,64	1,000	0,532
	Maret	134,1	130,5	73,8	11,72	0,000	58,28	58,28	1,000	0,603
	April	155,4	151,5	86,0	25,82	0,000	56,10	56,40	1,000	0,502
	Mei	141,1	137,2	77,8	15,53	0,000	58,28	58,28	1,000	0,574
	Juni	157,8	153,1	86,4	25,97	0,000	56,40	56,40	0,995	0,496
	Juli	173,1	168,2	94,2	31,53	0,000	58,28	58,28	1,000	0,468
	Agustus	180,7	176,2	98,7	35,11	0,000	58,28	58,28	1,000	0,448
	September	190,5	186,3	102,7	41,91	0,000	56,40	56,40	1,000	0,411
	Oktober	199,9	195,7	109,0	46,36	0,000	58,28	58,28	1,000	0,405
	November	145,0	141,4	79,5	19,12	0,000	56,40	56,40	1,000	0,541
	Desember	126,7	123,1	70,0	14,86	0,619	52,08	52,70	1,988	0,571
		Tahun	1865,8	1817,8	1022,5	300,40	0,916	674,12	675,0	0,999
Variasi 2	Januari	124,1	120,5	68,6	11,26	0,000	52,67	52,67	1,000	0,590
	Februari	137,4	134,2	75,9	19,78	0,000	52,61	52,61	1,000	0,532
	Maret	134,1	130,5	73,8	11,05	0,000	58,25	58,25	1,000	0,603
	April	155,4	151,5	86,1	26,78	0,850	55,52	56,37	0,985	0,496
	Mei	141,1	137,2	77,8	15,53	0,000	58,25	58,25	1,000	0,573
	Juni	157,8	153,1	86,4	26,18	0,000	56,37	56,37	1,000	0,496
	Juli	173,1	168,2	94,2	32,08	0,000	58,25	58,25	1,000	0,467
	Agustus	180,7	176,2	96,7	35,57	0,000	58,25	58,25	1,000	0,448
	September	190,5	186,3	102,7	42,26	0,000	56,37	58,37	1,000	0,411
	Oktober	199,9	195,7	109,0	46,91	0,000	58,25	58,25	1,000	0,405
	November	145,0	141,4	79,5	18,96	0,000	56,37	56,37	1,000	0,540
	Desember	128,7	123,1	70,0	14,42	0,000	51,82	52,67	1,984	0,568
		Tahun	1865,8	1817,8	1022,6	301,79	1,696	672,95	674,64	0,997
Variasi 3	Januari	124,1	121,4	73,0	16,12	0,000	52,67	52,67	1,000	0,590
	Februari	137,4	135,0	80,1	23,99	0,000	52,61	52,61	1,000	0,532
	Maret	134,1	131,4	78,5	16,05	0,000	58,25	58,25	1,000	0,603
	April	155,4	152,6	91,1	30,76	0,137	56,23	56,37	0,998	0,503
	Mei	141,1	138,3	82,8	20,46	0,000	58,25	58,25	1,000	0,573
	Juni	157,8	154,4	92,0	31,54	0,000	56,37	56,37	1,000	0,496
	Juli	173,1	169,6	100,2	37,58	0,000	58,25	58,25	1,000	0,467
	Agustus	180,7	177,5	104,6	42,10	0,000	58,25	58,25	1,000	0,448
	September	190,5	187,4	108,7	47,78	0,000	56,37	56,37	1,000	0,411
	Oktober	199,9	196,8	114,9	52,17	0,000	58,25	58,25	1,000	0,405
	November	145,0	142,2	84,2	23,82	0,000	56,37	56,37	1,000	0,540
	Desember	126,7	124,0	74,3	18,12	0,000	52,67	52,67	1,000	0,578
		Tahun	1865,8	1830,6	1064,4	360,50	0,137	674,51	674,64	1,000
Variasi 4	Januari	124,1	121,4	73,0	15,69	0,000	52,70	52,70	52,70	0,590
	Februari	137,4	135,0	80,2	24,12	0,000	52,64	52,64	52,64	0,532
	Maret	134,1	131,4	78,5	15,88	0,000	58,28	58,28	58,28	0,603
	April	155,4	152,6	91,1	31,84	0,789	55,60	56,40	56,40	0,497
	Mei	141,1	138,3	82,8	20,39	0,000	58,28	58,28	58,28	0,574
	Juni	157,8	154,4	92,0	31,87	0,000	56,40	56,40	56,40	0,496
	Juli	173,1	169,6	100,2	38,16	0,000	58,28	58,28	58,28	0,468
	Agustus	180,7	177,5	104,7	42,45	0,000	58,28	58,28	58,28	0,448
	September	190,5	187,4	108,7	48,32	0,000	56,40	56,40	56,40	0,411
	Oktober	199,9	196,8	114,9	52,42	0,000	58,28	58,28	58,28	0,405
	November	145,0	142,2	84,2	23,86	0,000	56,40	56,40	56,40	0,541
	Desember	126,7	124,0	74,3	17,45	0,000	52,70	52,70	52,70	0,578
		Tahun	1865,8	1830,6	1084,5	362,44	0,798	674,24	675,04	0,999

Keterangan: GlobHor = Global horizontal irradiation, GlobEff = Effective Global, corr, for IAM and Shadings, EUnused = Unused energy (battery full), E_Avail = Available Solar Energy, E_Miss = Missing energy, E_User = Energy supplied to the user, E_Load = Energy need to the user (Load), SolFrac = Solar fraction (EUsed/ELoad), PR = Performance Ratio

Tabel 5. Perbandingan hasil simulasi PLTS

Variasi	Energi Listrik Array STC (<i>E_avail</i>) kWh	Energi Tersuplai (<i>E_Load</i>) kWh	Pemenuhan Energi (<i>Solfrac</i>) %	PR Ratio
1	1022	674,12	99,9	0,501
2	1022	672,90	99,7	0,501
3	1084	674,51	100	0,502
4	1084	674,24	99,9	0,502

Tabel 6. Biaya investasi awal sistem PLTS

Variasi	Nama Komponen	Jumlah	Harga	Total Harga
Variasi 1	Panel Sunasia 120Wp	6 Modul	Rp 600.000	Rp 3.600.000
	Solar Charge Controller Epever	1 Buah	Rp 1.500.000	Rp 1.500.000
	Baterai Inpowers 12V 160Ah	2 Buah	Rp 3.500.000	Rp 7.000.000
	Inverter 800W	1 Buah	Rp 2.000.000	Rp 2.000.000
	Penyangga Panel	1 set	Rp 1.000.000	Rp 1.000.000
	Pembumian Panel	1 set	Rp 250.000	Rp 250.000
	Kabel	1 set	Rp 500.000	Rp 500.000
	Proteksi	1 set	Rp 200.000	Rp 200.000
	Jasa dan lain-lain	1 set	Rp 1.500.000	Rp 1.500.000
			Total	Rp 17.550.000
Variasi 2	Panel Sunasiar 120Wp	6 Modul	Rp 600.000	Rp 3.600.000
	Solar Charge Controller Epever	1 Buah	Rp 1.500.000	Rp 1.500.000
	Baterai Kijo 12V 80 Ah	4 Buah	Rp 2.000.000	Rp 8.000.000
	Inverter 800W	1 Buah	Rp 2.000.000	Rp 2.000.000
	Penyangga Panel	1 set	Rp 1.000.000	Rp 1.000.000
	Pembumian Panel	1 set	Rp 250.000	Rp 250.000
	Kabel	1 set	Rp 500.000	Rp 500.000
	Proteksi	1 set	Rp 200.000	Rp 200.000
	Jasa dan lain-lain	1 set	Rp 1.500.000	Rp 1.500.000
			Total	Rp 18.550.000
Variasi 3	Panel Canadian Solar 360Wp	2 Modul	Rp 2.100.000	Rp 4.200.000
	Solar Charge Controller Epever	1 Buah	Rp 1.500.000	Rp 1.500.000
	Baterai Inpowers 12V 160Ah	2 Buah	Rp 3.500.000	Rp 7.000.000
	Inverter 800W	1 Buah	Rp 2.000.000	Rp 2.000.000
	Penyangga Panel	1 set	Rp 1.000.000	Rp 1.000.000
	Pembumian Panel	1 set	Rp 250.000	Rp 250.000
	Kabel	1 set	Rp 500.000	Rp 500.000
	Proteksi	1 set	Rp 200.000	Rp 200.000
	Jasa dan lain-lain	1 set	Rp 1.500.000	Rp 1.500.000
			Total	Rp 18.150.000
Variasi 4	Panel Canadian Solar 360Wp	2 Modul	Rp 2.100.000	Rp 4.200.000
	Solar Charge Controller Epever	1 Buah	Rp 1.500.000	Rp 1.500.000
	Baterai Kijo 12V 80Ah	4 Buah	Rp 2.000.000	Rp 8.000.000
	Inverter 800W	1 Buah	Rp 2.000.000	Rp 2.000.000
	Penyangga Panel	1 set	Rp 1.000.000	Rp 1.000.000
	Pembumian Panel	1 set	Rp 250.000	Rp 250.000
	Kabel	1 set	Rp 500.000	Rp 500.000
	Proteksi	1 set	Rp 200.000	Rp 200.000
	Jasa dan lain-lain	1 set	Rp 1.500.000	Rp 1500.000
			Total	Rp 19.150.000

Penghematan energi listrik pada sistem genset diasumsikan sama dengan penghematan PLTS dengan alasan penggunaan beban yang sama. Dengan daya yang dihasilkan diasumsikan 674 kWh/tahun, didapatkan nilai NPV dalam masa proyek 24 tahun sebesar -

Rp173.514.432. Karena nilai NPV bernilai negatif maka investasi pada sistem genset tidak layak untuk dilaksanakan.

Tabel 7. Biaya operasional sistem PLTS per tahun

Nama Variasi	O&M Komponen	Penggantian Baterai	Total
1	Rp 160,500	Rp 875.000	Rp 1.035.500
2	Rp 170,500	Rp 1.000.000	Rp 1.170.500
3	Rp 166,500	Rp 875.000	Rp 1.041.500
4	Rp 176,500	Rp 1.000.000	Rp 1.176.500

Tabel 8. Penghematan sistem PLTS

Nama Variasi	kWh / Tahun	Harga	Total Harga
1	674,12	Rp 1.467	Rp 988.934
2	672,90	Rp 1.467	Rp 987.144
3	674,51	Rp 1.467	Rp 989.506
4	674,24	Rp 1.467	Rp 989.110

Tabel 9. Nilai NPV PLTS variasi 1, 2, 3 dan 4

Nama Variasi	PWC	PWB	NPV
1	Rp 54.268.068	Rp 35.066.874	-Rp 19.201.195
2	Rp 60.055.069	Rp 35.003.411	-Rp 25.051.658
3	Rp 55.080.824	Rp 35.087.161	-Rp 19.993.663
4	Rp 60.867.824	Rp 35.073.116	-Rp 25.794.709

Tabel 10. Modal awal penggunaan genset

Nama Komponen	Jumlah	Harga	Total Harga
Generator Set	1 set	Rp 5.720.000	Rp 5.720.000
Silent 1 KVA			
Kabel	1 set	Rp 500.000	Rp 500.000
Proteksi	1 set	Rp 200.000	Rp 200.000
Jasa dan lain-lain	1 set	Rp 500.000	Rp 500.000
Total			Rp 6.920.000

Tabel 11. O&M Penggunaan genset per tahun

Nama Komponen	Total Harga
O&M Komponen	Rp 64.200
Bahan bakar	Rp 5.622.750
Total	Rp 5.686.950

Tabel 12. Modal awal sistem charging

Nama Komponen	Jumlah	Harga	Total Harga
Charger Baterai Suoer	1 Buah	Rp 250.000	Rp 250.000
Baterai Inpowers 12V 160Ah	2 Buah	Rp 3.500.000	Rp 7.000.000
Inverter 800W	1 Buah	Rp 2.000.000	Rp 2.000.000
Kabel	1 set	Rp 500.000	Rp 500.000
Proteksi	1 set	Rp 200.000	Rp 200.000
Jasa dan lain-lain	1 set	Rp 500.000	Rp 500.000
Total			Rp 10.450.000

Tabel 13. O&M Sistem charging baterai per tahun

Nama Komponen	Total Harga
O&M Komponen	Rp 64.200
Bahan bakar	Rp 5.622.750
Total	Rp 5.686.950

Tabel 14. Perbandingan nilai NPV dan PWC

Nama Variasi	NPV
PLTS Variasi 1	-Rp 19.201.195
PLTS Variasi 2	-Rp 25.051.658
PLTS Variasi 3	-Rp 19.993.663
PLTS Variasi 4	-Rp 25.794.709
Generator	-Rp 173.514.432
Sistem Charging	-Rp 46.164.256

C. Sistem Charging Baterai dari PLN

Biaya investasi penggunaan baterai dengan charging dari PLN ditunjukkan pada Tabel 12. Daya yang digunakan untuk charging baterai yaitu sebesar daya beban ditambah rugi-rugi sistem yaitu sekitar 2 KWH per hari. Sehingga biaya untuk operasional penggunaan sistem ini dalam satu tahun dapat ditunjukkan dalam Tabel 13.

Penghematan energi listrik pada sistem genset diasumsikan sama dengan penghematan PLTS dengan

alasan penggunaan beban yang sama. Dengan daya yang dihasilkan diasumsikan 674 kWh/tahun, didapatkan nilai NPV dalam masa proyek 24 tahun sebesar -Rp 46.164.256. Karena nilai NPV bernilai negatif maka investasi pada sistem charging tidak layak untuk dilaksanakan.

D. Perbandingan

Dari hasil analisis yang didapat untuk semua alternatif yang ada, dapat dibuat perbandingan seperti pada Tabel 14. Berdasarkan Tabel 16, dapat dilihat nilai

NPV pada setiap alternatif bernilai negatif. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semua investasi untuk variasi tidak layak secara ekonomi. Namun PLTS variasi 1 dan 3 merupakan variasi yang paling murah bila dibandingkan dengan alternatif sumber listrik lain.

4. Kesimpulan

Sistem pembangkit listrik tenaga surya yang dirancang dalam penelitian ini adalah sistem *off-grid*. Perencanaan PLTS dibagi menjadi empat variasi yang masing-masing memiliki konfigurasi tersendiri. Kombinasi yang divariasikan adalah panel surya dengan baterai. Alternatif komponen yang akan digunakan masing-masing adalah 2 merk Panel Surya dan 2 merk baterai. Listrik yang dihasilkan dari PLTS berkisar antara 672-675 kWh per tahun dan masing-masing variasi perencanaan ini dianggap tidak layak karena memiliki nilai NPV kurang 0, namun nilai investasi PLTS ini masih jauh lebih hemat dan murah bila dibandingkan menggunakan sumber listrik genset maupun sistem charging baterai dari PLN. Berdasarkan analisis teknis-ekonomis yang telah dilakukan sebelumnya, investasi yang paling layak adalah variasi pertama dan ketiga karena sama-sama memiliki nilai NPV paling besar yaitu -Rp19.201.195.

Daftar Pustaka

- Badaruddin, B., & Hardiansyah, F. (2015). Perhitungan Optimasi Bahan Bakar Solar pada Pemakaian Generator Set Di BTS. *Jurnal Teknologi Elektro*, 6(2), 142512.
- Bagaskoro, B., Windarta, J., & Denis, D. (2019). Perancangan Dan Analisis Ekonomi Teknik Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sistem Offgrid Menggunakan Perangkat Lunak Homer Di Kawasan Wisata Pantai Pulau Cemara. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 8(2), 152-157.
- Bank Indonesia. (2021). *Monetary Data Bank Indonesia*. Diakses dari <https://www.bi.go.id/en/moneter/Contents/Default.aspx>, tanggal 02 Juni 2021
- Dewan Energi Nasional. (2019). *Outlook Energi Indonesia 2019*. Dewan Energi Nasional, 75. <https://www.den.go.id/index.php/publikasi/index/EnergyOutlook>
- Harrouni, S. (2008). Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Recent Advances. In *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Recent Advances* (pp. 29–54). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77455-6_2
- King, D. L., Boyson, W. E., & Kratochvil, J. A. (2002). Analysis of factors influencing the annual energy production of photovoltaic systems. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1356–1361. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2002.1190861>
- Louie, H. (2018). Energy Poverty: Off-Grid Electrical Systems in Developing Countries. In *Off-Grid Electrical Systems in Developing Countries*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91890-7_2
- Ma, T., Yang, H., & Lu, L. (2017). Long term performance analysis of a standalone photovoltaic system under real conditions. *Applied Energy*, 201, 320–331. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.126>
- Pujawan, I. N. (2009). *Ekonomi Teknik*. Edisi Kedua. Jakarta: PT. Guna Widya.
- Ramadhani, B. (2018). *Instalasi pembangkit listrik tenaga surya Dos & Don'ts*. Jakarta: Energising Development (EnDev) Indonesia.
- Rekhashree, D. J., & Naganagouda, H. (2018). Study on Design and Performance Analysis of Solar PV Rooftop Standalone and On Grid System Using PVSYSY. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(07).
- Shrivastava, A., Sharma, R., Saxena, M. K., Shanmugasundaram, V., & Rinawa, M. L. (2021). Solar energy capacity assessment and performance evaluation of a standalone PV system using PVSYSY. *Materials Today: Proceedings*
- The Joint Research Centre (2021). *TMY generator*. Diakses dari <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/tools/tmy>