

Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Photovoltaic - Fuel Cell

Elisa Rachmawati¹, Sri Paryanto Mursid², Apip Pudir³

¹*Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40559
E-mail : elisa.rachmawati.tptl18@polban.ac.id*

²*Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40559
E-mail : sp.mursid@gmail.com*

³*Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40559
E-mail : apipp055@gmail.com*

ABSTRAK

Percepatan transisi energi di Indonesia tertuang dalam RUPTL 2021-2030, di mana Indonesia akan mulai meminimalkan penggunaan energi berbahan bakar fosil dan beralih kepada penggunaan energi baru dan terbarukan (EBT) yang lebih bersih dengan target bauran energi dan terbarukan pembangkit tenaga listrik sebesar 23% tercapai pada akhir tahun 2025. Selain itu, PLN mendorong kajian pengembangan pembangkit hibrida pada beberapa teknologi alternatif lain, salah satunya adalah *fuel cell* (hidrogen). Sistem PLT Hybrid skala rumah tangga *off-grid* sebagai representasi terhadap kebutuhan energi listrik di wilayah *isolated* Indonesia dirancang melalui perhitungan teknis, pemilihan komponen dalam sistem, dan pemodelan serta optimasi menggunakan perangkat lunak *HOMER Energy* dimulai dari penentuan parameter-parameter perancangan awal, perencanaan dan pembagian kerja sistem tenaga sel fotovoltaik (PLTS) dan sistem tenaga *fuel cell* (PLTFC), hingga analisis hasil rancangan yang dapat menyuplai energi listrik dengan baik dan mandiri dalam wilayah tersebut.

Kata Kunci

PLTH skala rumah tangga, Off-grid, Fuel Cell, Fotovoltaik.

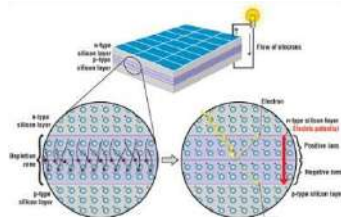
PENDAHULUAN

Percepatan transisi energi di Indonesia tertuang dalam Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030, yang mana disebutkan bahwa Indonesia akan mulai meminimalkan penggunaan energi berbahan bakar fosil [1] dan beralih kepada penggunaan energi baru dan terbarukan (EBT) yang lebih bersih dengan menargetkan pembangunan sebanyak 51,6% pembangkit di Indonesia merupakan pembangkit dengan sumber daya energi baru dan terbarukan sehingga target bauran energi dan terbarukan pembangkit tenaga listrik sebesar 23% tercapai pada akhir tahun 2025. Selain itu, guna melayani pertumbuhan pelanggan, meningkatkan mutu pelayanan kelistrikan, dan menurunkan biaya pokok produksi ketenagalistrikan di wilayah-wilayah terisolasi, Perusahaan Listrik Nasional (PLN) mendorong kajian pengembangan pembangkit hibrida dengan kapasitas hingga 10 MW pada beberapa teknologi alternatif lain, salah satunya adalah *fuel cell* (hidrogen), yang menjadi opsi menarik untuk digunakan sebagai sumber

pembangkitan karena memiliki efisiensi yang cukup tinggi, respon beban yang cepat, modularitas, dan fleksibilitas bahan bakar. Hidrogen sebagai sumber energi bersih yang tersedia dari ekstraksi air sangat mendukung strategi energi nol karbon karena produk sampingannya hanya berupa air dan panas. Dari sumber daya EBT yang ada, PLN merencanakan penggunaan energi surya sebagai energi utama terutama karena sifatnya yang berkelanjutan dan tersedia di seluruh wilayah Indonesia. Oleh karena itu, pembangkit listrik hybrid yang menggunakan energi surya (*photovoltaic cell*) dan energi bahan bakar (*fuel cell*) akan dirancang. Tujuan yang hendak dicapai dari penelitian ini adalah merencanakan pembangkit listrik tenaga *hybrid* menggunakan *sel photovoltaic* dan *fuel cell* yang optimal dan layak sehingga memenuhi kebutuhan energi listrik secara baik dan mandiri sebagai representasi terhadap kebutuhan energi listrik di wilayah *isolated*.

2. TINJAUAN PUSTAKA

17.7 Sistem Sel Fotovoltaik



Gambar 1. Skema sel fotovoltaik

Ketika cahaya matahari dalam bentuk foton diserap oleh sel fotovoltaik, elektron mendapatkan energi yang cukup untuk dapat bergerak bebas secara acak di lapisan tipe-n dan bergerak ke lapisan tipe-p untuk mengisi kekosongan *hole*. Akibat perpindahan elektron ini, terbentuk medan listrik di daerah deplesi (*p-n junction*) yang akan mendorong elektron bergerak kembali ke sisi anoda (lapisan tipe-n) menciptakan aliran arus listrik sementara *hole* akan terdorong ke sisi katoda (lapisan tipe-p). Akibatnya, konsentrasi elektron di sisi-n dan konsentrasi *hole* di sisi-p menjadi sangat tinggi dan terjadi perbedaan potensial [2]. Energi foton yang diserap didefinisikan sebagai [3]

$$E = h \cdot c / \lambda$$

(2)

Di mana,

h : konstanta Planck (6.63×10^{-34} J.s)

c : kecepatan cahaya dalam ruang

hampa

(3×10^8 m/s)

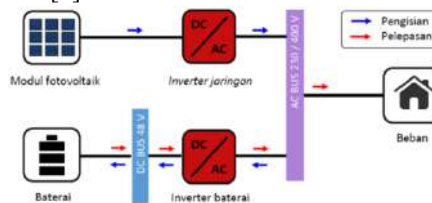
λ : panjang gelombang dalam meter

Salah satu sistem PLTS, yaitu sistem *off-grid* yang sistem kelistrikannya tidak terhubung dengan jaringan listrik umum menjadi sistem yang cocok untuk aplikasi di wilayah *isolated* atau wilayah yang sulit dijangkau oleh jaringan PLN untuk membentuk jaringan listrik yang sifatnya mandiri. Sistem PLTS *off-grid* umumnya memiliki komponen-komponen sistem berupa:

- panel surya (panel fotovoltaik), yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik DC;
- kontroler (hanya pada DC coupling), yang mengatur pengisian dan pengeluaran arus listrik pada baterai;
- inverter, yang mengubah arus DC menjadi arus AC untuk keperluan beban-beban AC; dan
- baterai, sebagai penyimpan energi listrik.

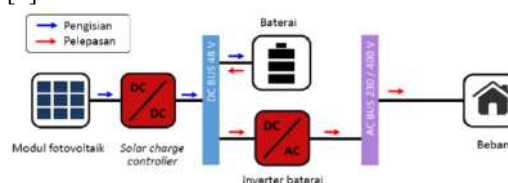
Implementasi konfigurasi kerja PLTS *off grid* terdiri dari *AC coupling* dan *DC coupling*.

Pada konfigurasi *AC coupling*, ketika terdapat energi cahaya matahari, inverter jaringan akan mengalirkan listrik AC ke beban baru kemudian ke baterai melalui inverter baterai (proses pengisian baterai). Ketika tidak terdapat cahaya matahari, inverter baterai akan memutus inverter jaringan dan mengambil alih suplai listrik ke beban [4].



Gambar 2. AC coupling

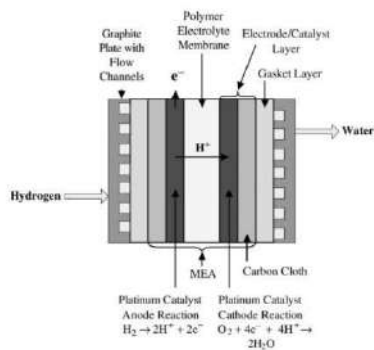
Sementara pada konfigurasi *DC coupling*, kontroler mengatur pengisian dan pengeluaran arus dari baterai. Baterai terhubung dengan inverter baterai untuk kemudian mengalirkan listrik AC ke beban [4].



Gambar 3. DC coupling

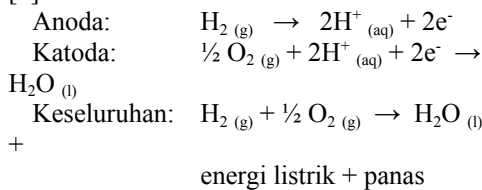
17.8 Sistem Sel Bahan Bakar

Sebuah sel bahan bakar terdiri dari elektroda bermuatan negatif (anoda), elektroda bermuatan positif (katoda), dan membran elektrolit. Bahan bakar (Hidrogen) diumpankan terus menerus dan dioksidasi di anoda. Begitupula oksidan (oksigen) diumpankan terus menerus dan direduksi di katoda. Proton diangkut dari anoda ke katoda melalui membran elektrolit, dan elektron dibawa ke katoda melalui sirkuit eksternal. Di katoda, oksigen bereaksi dengan proton dan elektron, membentuk air dan menghasilkan panas. Reaksi elektrokimia ini berlangsung di elektroda untuk menghasilkan arus listrik melalui elektrolit, sambil menggerakkan arus listrik komplementer yang melakukan kerja pada beban. [5]. 1 liter H₂ mengandung 120 MJ atau setara dengan 33.33 kWh energi LHV H₂ pada suhu ruangan dan tekanan atmosfer [6]



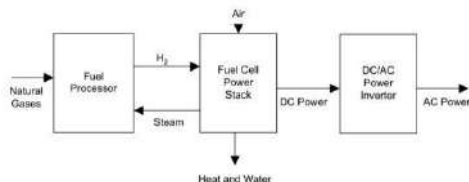
Gambar 4. Skema PEM *fuel cell*

Gambar 4 menunjukkan contoh sel bahan bakar tipikal (PEMFC) dengan reaksi berikut [5]:



Sebagian besar sistem tenaga sel bahan bakar terdiri dari sejumlah komponen [7]:

- Sel unit (*unit cell*), tempat berlangsungnya reaksi elektrokimia
- *Stack*, merupakan penggabungan sel unit secara modular dalam tumpukan sel (*stack*) dan dihubungkan secara seri melalui interkoneksi konduktif elektrik untuk mencapai unit dengan kapasitas keluaran tegangan dan daya yang dibutuhkan.
- *Balance of Plant* (BOP), terdiri dari komponen yang menyediakan pengkondisian aliran umpan (termasuk prosesor bahan bakar jika diperlukan), manajemen termal, dan pengkondisian daya listrik di antara fungsi tambahan dan antarmuka lainnya.



Gambar 5. Sistem *fuel cell* sederhana [8]

Klasifikasi sel bahan bakar (*fuel cell*) umumnya berdasarkan jenis elektrolit yang digunakan. Pemilihan jenis elektrolit ini akan menentukan kisaran suhu operasi dari sel bahan bakar yang juga menentukan sifat fisikokimia dan termomekanis bahan yang digunakan dalam komponen sel serta

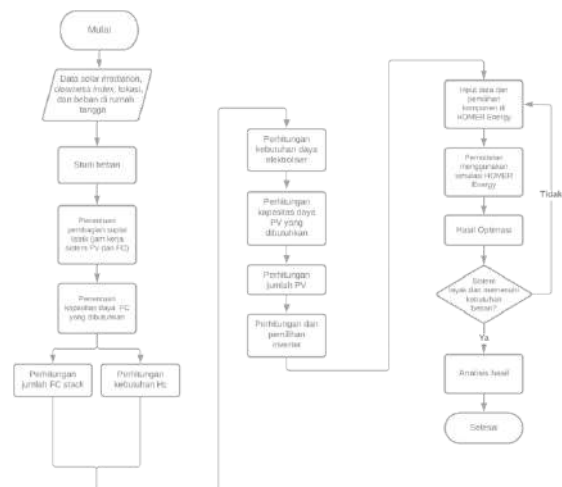
menentukan tingkat pemrosesan bahan bakar yang diperlukan.

Tabel 1. Kondisi operasi berbagai jenis sel bahan bakar

Sistem <i>Fuel Cell</i>	PEM FC	DM FC	SO FC	AFC	PA FC	MC FC
Fuel	H ₂	CH ₃ O H + H ₂ O	CO , H ₂	H ₂	H ₂	H ₂ /C O/ <i>Reformate</i>
Oxidizer	O ₂ , udara	O ₂ , udara	O ₂ , udara	O ₂ , udara	O ₂ , udara	CO ₂ , O ₂ , udara
Suhu Operasi	Suhu ruang an s.d 100°C	Suhu ruang an s.d 100°C	600 -1000°C	Suhu ruang an s.d 250°C	150 -220°C	620- 660°C
Tekanan Operasi	1-3 atm	1-3 atm	1 atm	1-4 atm	3-10 atm	1-10 atm
Kontaminan	CO<100 ppm, sulfur, debu	CO<100 ppm, sulfur, debu	Sulfur <100 ppm	CO ₂	CO<100 ppm, sulfur, debu, NH ₃	H ₂ S, HCl, As, H ₂ Se, NH ₃ , AsH ₃ , debu

3. METODOLOGI PENELITIAN

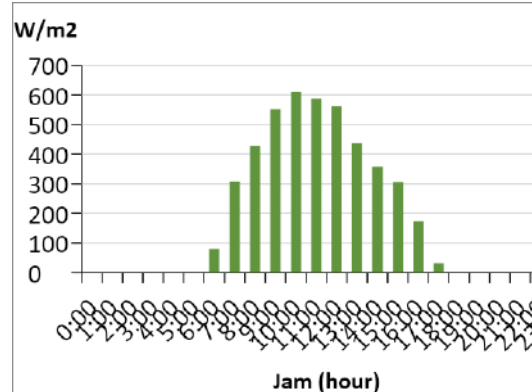
Metodologi penelitian yang dilakukan mengikuti tahapan-tahapan sesuai dengan diagram alir yang mana di mulai dari pengambilan data penelitian, studi beban, hingga simulasi sistem.



Gambar 6. Diagram alir tahapan perancangan pembangkit *hybrid PV-FC*

3.1 Iradiasi Matahari

Data iradiasi matahari didapatkan melalui pengukuran secara langsung menggunakan alat *pyranometer* selama 7 hari mulai dari pukul 06.00-18.00 WIB setiap selang waktu 10 detik untuk mengetahui besarnya daya yang dapat dihasilkan oleh matahari per meter persegi setiap jamnya.



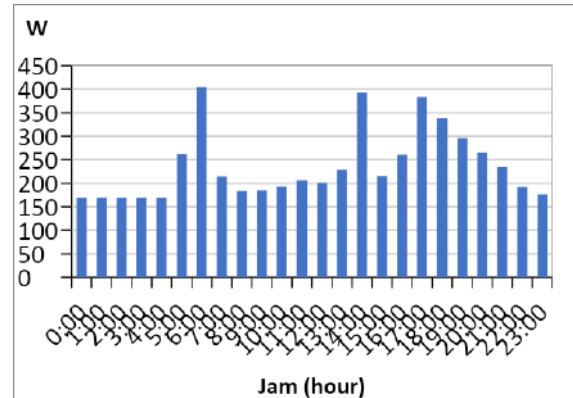
Gambar 7. Grafik iradiasi matahari

3.2 Konsumsi Energi Harian

Data konsumsi energi harian pada rumah tangga didapatkan dengan melakukan identifikasi beban dan pengamatan secara langsung pemakaian beban rata-rata selama 7 hari setiap selang waktu 1 jam.

Tabel 2. Daftar beban di rumah tangga

No	Jenis Beban	Daya (W)	Jumlah	Daya total (W)
1	Lampu LED 1	20	4	80
2	Lampu LED 2	10	4	40
3	Setrika	350	1	350
4	TV	90	1	90
5	Kipas angin	55	1	55
6	Rice Cooker (cook)	400	1	400
	Rice Cooker (warm)	45	1	45
7	Kulkas	50	1	50
8	HP 1	5	2	10
9	HP 2	10	1	10
10	HP 3	24,93	1	24,93
11	Laptop	45	1	45
12	Hair Dryer	400	1	400
TOTAL				1599,93



Gambar 8. Profil konsumsi energi harian rata-rata

3.3 Perancangan Sistem Fuel Cell

Waktu operasi: 17.00–7.00 WIB.

Energi yang perlu disuplai: 3.4011 kWh/hari.

Total arus dalam *fuel cell*,

$$I = \frac{P_{max}}{V_{cell}} = \frac{404.99 \text{ W}}{0.6 \text{ V}} = 674.9833 \text{ A} \quad (2)$$

Jumlah *cell* yang diperlukan dalam *stack* sebanyak

$$n = \frac{V_{st}}{V_{cell}} = \frac{24 \text{ V}}{0.6 \text{ V}} = 40 \text{ cells} \quad (3)$$

Total luas *stack*

$$A_{st} = \frac{I}{i} = \frac{674.9833 \text{ A}}{500 \text{ mA/cm}^2} = 1349.9666 \text{ cm}^2 \quad (4)$$

Luas area per *cell*

$$A_{cell} = \frac{A_{st}}{n} = 33.7492 \text{ cm}^2/\text{cell} \quad (5)$$

Jumlah hidrogen yang dibutuhkan

$$m_{H_2} = \frac{E \times 3600}{\eta \times LHV} = \frac{(3.4011 \frac{\text{kWh}}{\text{hari}}) \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}}{(0.4) \times (120000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})} \quad (6)$$

$$= 0.2551 \text{ kg/hari}$$

Tangki Penyimpanan Hidrogen

Jika hari otonom selama 2 hari dan dirancang maksimum terjadi selama dua kali dalam sebulan maka kebutuhan hidrogen harian menjadi 0.3102 kg/hari. Sehingga, tangki penyimpanan hidrogen yang diperlukan memiliki kapasitas sebesar 1.9597 kg $\approx$ 2 kg.

Elektroliser

Untuk menghasilkan 1 Nm³ hidrogen dibutuhkan energi sebesar 2.94 kWh [9]. Dari

kebutuhan hidrogen harian dapat ditentukan energi harian yang dibutuhkan oleh elektroliser

$$\begin{aligned} E_{el} &= m_{H_2} \times 2,94 \text{ kWh/Nm}^3 H_2 \\ (7) \quad &= 0,3102 \text{ kg } H_2 \times 2,94 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3 H_2} \\ &= 10,1467 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Sehingga kapasitas terpasang elektroliser adalah sebesar 2 kW.

3.4 Perancangan Sistem Photovoltaic

Waktu operasi: 7.00-17.00 WIB

Energi harian yang perlu disuplai: 12.4275 kWh

Daya puncak PV

$$\begin{aligned} P_{peak} &= \frac{E_{load}}{\text{Iradiasi rata-rata harian}} \\ (8) \quad &= \frac{12,4275 \text{ kWh}}{4,4307 \text{ h}} \\ &= 2,8049 \text{ kWp} \end{aligned}$$

Dengan menambah 15% s.d. 25% sebagai rugi-rugi sistem maka kapasitas terpasang PV sebesar 3,3 – 3,8 kWp [10].

Luas area efektif

$$\begin{aligned} A_{PV} &= \frac{P_{peak}}{\eta_{PV}} = \frac{3,8 \text{ kWp}}{0,1913} \approx 20 \text{ m}^2 \\ (9) \end{aligned}$$

Jumlah modul yang dibutuhkan

$$n_{PV} = \frac{P_{peak}}{Wp/modul} = \frac{3,8 \text{ kWp}}{0,25 \text{ kWp}} \approx 16 \text{ buah}$$

Kapasitas inverter [10][11]

$$\begin{aligned} P_{inverter} &= 1,25 P_{load,maks} \\ (10) \quad &= 1,25 (404,99 \text{ W}) \\ &= 506,2375 \text{ W} \end{aligned}$$

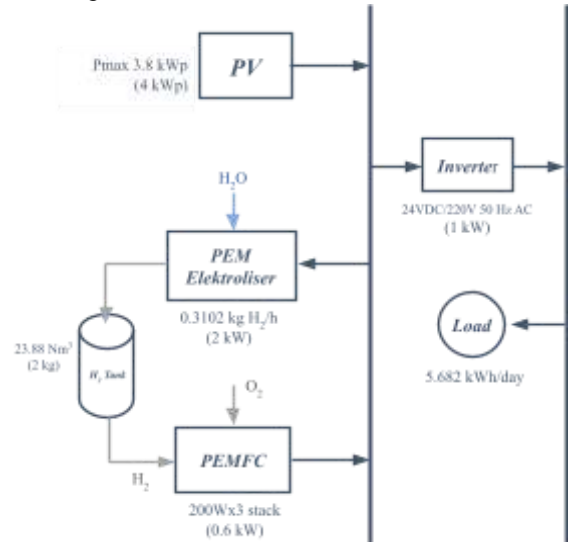
Dari nilai tersebut, dipilih inverter dengan kapasitas 1000 W atau 1 kW.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

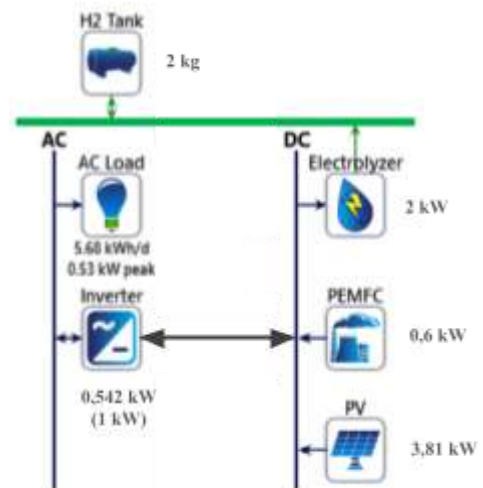
Sistem pembangkit *hybrid* ini terdiri dari sel fotovoltaik (PV) dan sistem *fuel cell* yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di rumah tangga perorangan. Listrik DC yang dihasilkan PV akan digunakan untuk suplai beban di siang hari dan untuk mendayai elektroliser.

Hidrogen yang diproduksi oleh elektroliser disimpan di tangki penyimpanan hidrogen (H_2 tank) sebelum disuplai ke *fuel cell*.

Dari hasil perhitungan teknis manual dan optimasi sistem oleh HOMER, sistem PV yang dirancang terdiri dari 16 buah panel 250 Wp (kapasitas total 4 kWp), tegangan maksimum 36 V, arus maksimum 6.95 A, dan efisiensi panel sebesar 19.13%.



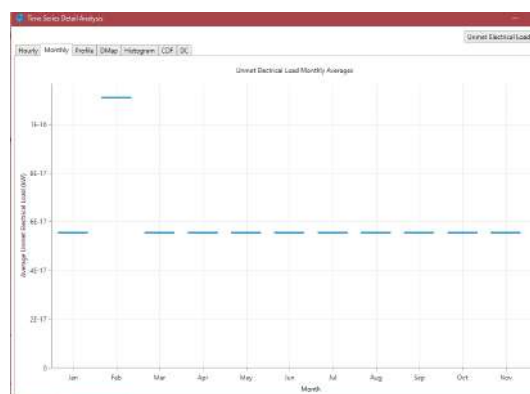
Gambar 9. Rancangan pembangkit listrik tenaga *hybrid photovoltaic – fuel cell*



Gambar 10. Hasil rancangan berdasarkan simulasi dan optimasi HOMER Energy

Sementara, sistem *fuel cell* dirancang untuk beroperasi selama energi matahari tidak cukup atau tidak ada sama sekali untuk menyuplai beban secara penuh. *Fuel cell* yang dirancang merupakan jenis PEM terdiri dari 200W x 3 unit *stack* dengan kapasitas

terpasang sebesar 600 W, tegangan nominal stack sebesar 24 V, tegangan *cell* sebesar 0.6 V, dan jumlah *cell* dalam *stack* yaitu 40 *cells*. Reaksi elektrolisis untuk menghasilkan hidrogen dan oksigen dilakukan oleh elektroliser jenis PEM yang mampu memproduksi hidrogen sebanyak kurang lebih $0.345 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$ dengan kemurnian >99.9% dan mengonsumsi daya listrik sebesar 2 kW.



Gambar 11. Total energi yang tidak tersuplai
Dari hasil simulasi yang ditunjukkan oleh Gambar 11 terlihat bahwa total energi beban yang tidak tersuplai sangatlah kecil yaitu senilai $6 \times 10^{-7} \text{ kW}$ sehingga dapat dikatakan bahwa pembangkit listrik tenaga *hybrid* yang dirancang dengan kapasitas total 4.6 kW terbukti dapat memenuhi kebutuhan listrik di rumah tangga dengan total beban 1599.93 W secara baik sepanjang tahun

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perhitungan, simulasi, dan optimasi sistem menggunakan software *HOMER Energy*, pembangkit *hybrid* dengan daya terpasang sebesar 4.6 kW terdiri dari PV (4 kW) dan PEM *fuel cell* (0.6 kW) ini memadai untuk memenuhi kebutuhan beban di rumah tangga terpilih yang memiliki rata-rata konsumsi energi harian sebesar 5.682 kWh.

Untuk perancangan yang lebih jauh dapat dipertimbangkan juga perancangan komponen-komponen pendukung seperti BOP pada sistem *fuel cell* serta penggunaan teknologi *fuel cell* maupun elektroliser serupa yang memiliki harga lebih murah seperti AEM (*Anion Exchange Membrane*).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IESR. (2021). Indonesia Can Achieve Carbon Neutrality Before 2060. *iesr.or.id*
- [2] ACS. 2014. How a Solar Cell Works. *acs.org*. URL: <https://www.acs.org/content/acs/en/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/archive-2013-2014/how-a-solar-cell-works.html>.
- [3] Hidayanti, F. 2021. *Aplikasi Sel Surya: Sistem Sel Surya Wearable*. Jakarta: LP_UNAS.

- [4] Putra, Y.A.P. 2022. *Solar Energy Electrical Bootcamp*. PT. Zaada Bana Engineering.
- [5] Emanuelsson S., Persson J. 2007. *Design of A Fuel Cell System*. Goteborg: Chalmers University of Technology.
- [6] Spiegel, Colleen. 2007. *Designing and Building Fuel Cells*. New York: McGraw-Hill.
- [7] EG&G Technical Services. 2004. *Fuel Cell Handbook 7th Ed*. Springfield: EG&G Technical Services, Inc.
- [8] Gencoglu, M.T. dan Ural, Z.. 2009. Design of a PEM fuel cell system for residential application. *International Journal of Hydrogen Energy*. vol 34, pp. 5242–5248.
- [9] Calise, F., D'Accadia, M.D., Santarelli, M., Lanzini, A., Ferrero, D.. 2019. *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies*. Academic Press.
- [10] Kencana, dkk. (2018). *Panduan Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat*. Jakarta: Tetra Tech ES, Inc.
- [11] Gumintang, M. A, dan Sofyan, M. F. (2020). *Design and Control of PV Hybrid System in Practice*. Jakarta: GIZ.