

Study of Green Hydrogen Production from Excess Electricity Off-Grid Rooftop PV, FT-02, Universitas Tidar

Arbye S¹, Achmad Aziizudin¹, Angger Bagus Prasetyo¹, Cahyo Wibi Yogiswara¹, Setya Drana Harry Putra¹, Herlambang Fawwaz Prabowo¹, Tiko Es Saputra Ceren¹.

¹Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Magelang, Indonesia.

Email: arbye.s@untidar.ac.id.

Received 16 April 2026 | Revised 21 April 2026 | Accepted 29 April 2026

ABSTRAK

Pemanfaatan PLTS atap berpotensi menghasilkan excess electricity ketika produksi energi surya melebihi kebutuhan beban, yang berpeluang dimanfaatkan untuk produksi green hydrogen melalui elektrolisis. Penelitian ini mengkaji potensi produksi green hydrogen berbasis excess electricity dari sistem PLTS atap di wilayah Magelang menggunakan pendekatan analitis berbasis data simulasi sekunder. Data utama diperoleh dari simulasi HOMER Pro pada sistem PLTS off-grid berkapasitas 14,6 kWp di Gedung FT02 Universitas Tidar. Potensi produksi hidrogen dihitung menggunakan pendekatan specific energy consumption (SEC) untuk tiga skenario teknologi: PEM electrolyzer, Alkaline Water Electrolyzer (AWE), dan HHO generator. Hasil analisis menunjukkan sistem PLTS objek kajian menghasilkan excess electricity sebesar 13.841 kWh/tahun (67,1% dari total produksi energi), yang berpotensi menghasilkan 240,71–287,75 kg H₂/tahun (PEM), 259,19–276,82 kg H₂/tahun (AWE), dan 153,79–238,64 kg H₂/tahun (HHO). Proyeksi indikatif pada enam lokasi PLTS atap di wilayah Magelang menunjukkan potensi produksi green hydrogen total sebesar 3.099–3.707 kg H₂/tahun untuk skenario PEM.

Kata kunci: green hydrogen, excess electricity, plts atap, elektrolisis, magelang.

ABSTRACT

Rooftop PV systems can generate excess electricity when solar production exceeds load demand, offering an opportunity for green hydrogen production through electrolysis. This study evaluates the potential green hydrogen production from excess electricity of a rooftop off-grid PV system in Magelang, using secondary simulation data. The main dataset was obtained from a HOMER Pro simulation of a 14.6 kWp off-grid rooftop PV system at the FT02 Building, Universitas Tidar. Hydrogen production potential was calculated using the specific energy consumption (SEC) approach for three technology scenarios: PEM electrolyzer, Alkaline Water Electrolyzer (AWE), and HHO generator. Results show the system produces 13,841 kWh/year of excess electricity (67.1% of total energy production), potentially yielding 240.71–287.75 kg H₂/year (PEM), 259.19–276.82 kg H₂/year (AWE), and 153.79–238.64 kg H₂/year (HHO). Indicative projections for six rooftop PV locations in Magelang show a total green hydrogen potential of 3,099–3,707 kg H₂/year under the PEM scenario.

Keywords: green hydrogen, excess electricity, rooftop solar PV, water electrolysis, magelang

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap semakin berkembang sebagai salah satu strategi transisi energi rendah karbon, karena teknologi ini dapat dipasang pada bangunan eksisting dan memanfaatkan potensi radiasi surya lokal. Di Indonesia, pengembangan PLTS atap didukung oleh potensi iradiasi surya, serta target peningkatan bauran energi baru dan terbarukan sebagaimana tertuang dalam kebijakan energi nasional [1][2]. Namun, peningkatan pemanfaatan PLTS atap tidak hanya menghadirkan peluang penghematan energi dan pengurangan emisi, tetapi juga menimbulkan tantangan teknis berupa ketidaksesuaian antara pola produksi energi surya dan pola konsumsi beban. Pada saat produksi PLTS melebihi kebutuhan beban, terutama pada siang hari, sistem berpotensi menghasilkan *excess electricity* atau surplus energi listrik yang tidak termanfaatkan secara optimal [3].

Di wilayah Magelang, pengembangan PLTS atap telah berlangsung di berbagai sektor bangunan, mulai dari institusi pendidikan, perkantoran pemerintah, perhotelan, hingga residensial. Data PLN UP3 Magelang tahun 2020 mencatat 8 pelanggan PLTS atap dengan total kapasitas terpasang mencapai 89,24 kWp, sedangkan potensi energi surya di Provinsi Jawa Tengah dilaporkan mencapai 8.753 MW [4]. Sejumlah penelitian akademik juga telah mendokumentasikan implementasi dan potensi PLTS atap di berbagai lokasi di Kota Magelang Kabupaten Magelang, yang menunjukkan bahwa wilayah ini memiliki kondisi iradiasi surya yang mendukung pengembangan sistem PLTS atap [5][6].

Namun demikian, karakteristik produksi PLTS yang intermiten menimbulkan tantangan teknis yang perlu mendapat perhatian serius. Pada siang hari ketika intensitas radiasi surya berada pada puncaknya, produksi energi PLTS sering kali melebihi kebutuhan beban aktual, kondisi yang dikenal sebagai *excess electricity*. Pada sistem *off-grid*, surplus ini tidak dapat diserap dan harus dibuang melalui perangkat *dump load* sehingga merepresentasikan pemborosan energi yang signifikan. Studi simulasi menunjukkan bahwa proporsi energi yang terbuang pada sistem *off-grid* dapat mencapai hingga lebih dari separuh dari total produksi tahunan [6]. Pada sistem *on-grid*, perubahan regulasi melalui Peraturan Menteri ESDM Nomor 2 Tahun 2024 menghapus mekanisme penghitungan ekspor-impor energi sebagai pengurang tagihan listrik pelanggan, sehingga insentif ekonomi langsung dari energi ekspor menjadi berkurang [7]. Kondisi ini menegaskan bahwa *excess electricity* dari PLTS atap merupakan potensi energi yang belum termanfaatkan dan membutuhkan solusi yang lebih produktif.

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengkaji potensi dan kelayakan teknis-ekonomis PLTS atap di wilayah Magelang [5][6]. Namun, kajian-kajian tersebut umumnya masih berfokus pada estimasi produksi energi, penghematan listrik, kelayakan investasi, dan pengurangan emisi. Belum ada di antaranya yang secara khusus membahas pemanfaatan *excess electricity* yang muncul dari ketidaksesuaian antara produksi PLTS dan profil konsumsi beban. Di sisi lain, studi mengenai produksi *green hydrogen* berbasis energi surya telah banyak dilakukan pada tingkat global [8], tetapi sebagian besar menggunakan total produksi energi PV sebagai *input* elektrolisis, bukan secara spesifik memanfaatkan *excess electricity* yang tidak terserap oleh beban [9]. Dengan demikian, masih terdapat celah penelitian pada kajian lokal yang menghubungkan potensi surplus energi PLTS atap dengan peluang produksi *green hydrogen*, khususnya pada konteks wilayah perkotaan tropis seperti Magelang. Berdasarkan latar belakang dan celah penelitian yang telah diuraikan, penelitian ini diarahkan untuk menjawab tiga permasalahan utama. Pertama, bagaimana karakteristik *excess electricity* yang dihasilkan oleh sistem PLTS *off-grid* di Gedung FT02 Universitas Tidar. Kedua, berapa potensi produksi *green hydrogen* yang dapat diperoleh dari pemanfaatan *excess electricity* tersebut berdasarkan skenario teknologi PEM *electrolyzer*, *alkaline water electrolyzer* (AWE), dan HHO generator. Ketiga, bagaimana proyeksi indikatif potensi produksi *green hydrogen* apabila pendekatan pemanfaatan *excess electricity*

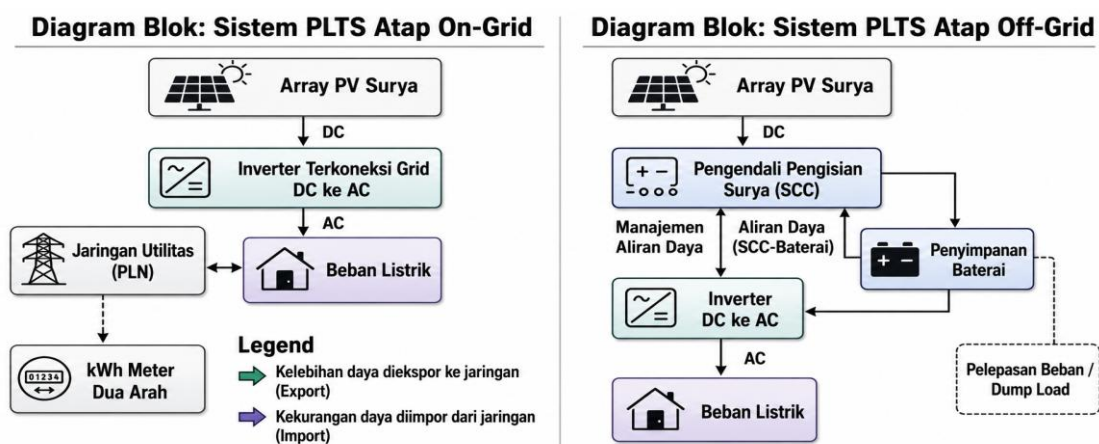
diterapkan pada beberapa sistem PLTS atap yang telah dikaji di wilayah Magelang. Sejalan dengan rumusan masalah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi *excess electricity* pada sistem PLTS *off-grid*, menghitung potensi produksi *green hydrogen*, serta menyusun proyeksi awal potensi produksi *green hydrogen* pada sistem PLTS atap lain di wilayah Magelang. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada kajian analitis berbasis data sekunder dan hasil simulasi HOMER Pro. Oleh karena itu, penelitian ini belum mencakup pengujian eksperimental, perancangan teknis rinci, analisis keselamatan, maupun analisis tekno-ekonomis seperti *levelized cost of hydrogen*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah sebagai dasar pengembangan kajian lanjutan dan strategi pemanfaatan surplus energi surya secara berkelanjutan di wilayah Magelang.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Sistem PLTS Atap

PLTS atap merupakan sistem pembangkit listrik berbasis teknologi fotovoltaik yang memanfaatkan permukaan atap atau bagian lain dari bangunan sebagai lokasi pemasangan modul surya [10]. Energi listrik DC yang dihasilkan panel dikonversi menjadi arus bolak-balik (AC) oleh inverter agar dapat dimanfaatkan oleh peralatan listrik pada bangunan. Teknologi ini semakin banyak diterapkan pada berbagai sektor — residensial, komersial, maupun institusi pendidikan — seiring meningkatnya kebutuhan akan sumber energi bersih [3]. Karakteristik utama produksi PLTS atap adalah sifatnya yang intermiten: energi hanya dihasilkan selama siang hari dengan intensitas yang bervariasi mengikuti kondisi iradiasi surya. Kinerja aktual sistem dipengaruhi oleh intensitas radiasi, sudut kemiringan panel, orientasi pemasangan, serta temperatur lingkungan, dengan rugi-rugi (*losses*) sistem yang berkisar 15–25% dari kapasitas terpasang [10]. Oleh karena itu, pemilihan data iradiasi yang representatif dari lokasi spesifik menjadi aspek penting dalam perancangan sistem PLTS atap.

Berdasarkan koneksinya terhadap jaringan listrik, PLTS atap dikategorikan menjadi dua konfigurasi utama yang memiliki konsekuensi berbeda terhadap pengelolaan surplus energi. Pada sistem *on-grid*, kelebihan produksi siang hari diekspor ke jaringan PLN melalui meter kWh ekspor-impor. Pada sistem *off-grid*, surplus energi hanya dapat diserap baterai; ketika baterai telah penuh, energi yang terus diproduksi harus dibuang melalui perangkat *dump load* [10]. Perbedaan mekanisme penanganan surplus ini menjadi dasar penting bagi analisis *excess electricity* dalam penelitian ini. Ilustrasi skema kedua konfigurasi disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Perbandingan Skema Sistem PLTS Atap Konfigurasi *On-Grid* dan *Off-Grid*

Dalam konteks wilayah Magelang, kondisi geografis dan karakteristik iklim tropis mendukung pengembangan sistem PLTS atap pada berbagai sektor bangunan. Namun, potensi produksi energi surya tersebut perlu diimbangi dengan strategi pengelolaan surplus energi, terutama pada sistem yang memiliki ketidaksesuaian antara kapasitas pembangkitan dan profil konsumsi beban [3][11].

2.2 Fenomena *Excess Electricity* pada Sistem PLTS Atap

Excess electricity merujuk pada bagian energi listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS namun tidak dapat diserap oleh beban maupun media penyimpanan pada waktu yang bersamaan, terutama terjadi saat intensitas radiasi surya berada pada puncaknya sementara kebutuhan beban relatif rendah [9]. Pada sistem PLTS *off-grid*, kondisi ini menjadi tantangan teknis yang kritis ketika baterai telah terisi penuh, energi yang terus diproduksi harus dibuang melalui perangkat *dump load* berupa *resistor bank* untuk menjaga stabilitas sistem [9]. Ajiwiguna dan Kirom menunjukkan bahwa pada desain sistem *off-grid* yang mengoptimalkan biaya, proporsi energi yang terbuang dapat mencapai 50,1% dari total produksi tahunan [12]. Kondisi serupa juga dijumpai secara konsisten pada gedung perkantoran dan institusi pendidikan di wilayah Magelang, di mana pola konsumsi listrik tidak selalu sebanding dengan puncak produksi surya siang hari [3][6].

Pada sistem PLTS *on-grid*, kelebihan produksi energi diekspor ke jaringan PLN melalui meter kWh ekspor-impor sehingga tidak terbuang secara langsung. Namun, perubahan regulasi melalui Peraturan Menteri ESDM Nomor 2 Tahun 2024 menghapus skema *net metering* yang sebelumnya berlaku, sehingga energi yang diekspor tidak lagi dihitung sebagai pengurang tagihan listrik pelanggan. Konsekuensinya, *excess electricity* pada kedua konfigurasi, baik *off-grid* maupun *on-grid*, kini sama-sama tidak memberikan manfaat optimal. Kondisi tersebut mendorong perlunya pendekatan baru dalam pengelolaan *excess electricity* dari PLTS atap. Pemanfaatan surplus energi untuk produksi *green hydrogen* melalui proses elektrolisis menjadi opsi yang semakin relevan, karena tidak hanya mencegah pemborosan energi surya yang sudah dihasilkan, tetapi juga mengkonversinya menjadi bentuk energi kimia yang dapat disimpan dan dimanfaatkan lebih lanjut [9][13].

2.3 Kondisi PLTS Atap di Wilayah Magelang

Wilayah Magelang memiliki potensi iradiasi surya yang sangat mendukung pengembangan PLTS atap. Berdasarkan data Global Solar Atlas pada koordinat $-7,477^{\circ}\text{LS}$, $110,218^{\circ}\text{BT}$, potensi radiasi surya tahunan di Kota Magelang tercatat sebesar $1.817,1 \text{ kWh/m}^2$, dengan rata-rata *Global Horizontal Irradiance* (GHI) harian melebihi $4,8 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ [3][14]. Kondisi ini menjadikan wilayah Magelang layak dan potensial untuk pengembangan sistem PLTS atap di berbagai sektor bangunan. Sejalan dengan potensi tersebut, sejumlah penelitian telah dilakukan untuk mengkaji kelayakan dan kinerja PLTS atap di berbagai lokasi dan sektor di wilayah Magelang seperti yang disajikan pada Tabel 1. Berbagai penelitian tersebut menggambarkan kondisi perkembangan PLTS atap di wilayah Magelang yang mencakup beragam sektor dan skala kapasitas.

Tabel 1. Rangkuman Penelitian PLTS Atap di Wilayah Magelang

No	Peneliti & Tahun	Lokasi	Kapasitas (kWp)	Produksi (kWh/tahun)
1	[11]	FT03 Untidar, Kota Magelang	124,74	135.300
2	[6]	FT02 Untidar, Kota Magelang	14,6	20.638
3	[15]	FT01 Untidar, Kota Magelang	32	26.682
4	[16]	Kantor Dinas P&K, Kab. Magelang	–	70.930
5	[5]	Atria Hotel, Kota Magelang	4,58	6.656
6	[10]	Rumah tinggal, Kota Magelang	0,846	1.289,69

Dari peta penelitian tersebut terlihat bahwa beberapa sistem PLTS atap di wilayah Magelang memiliki indikasi surplus energi, baik melalui data ekspor ke jaringan maupun ketidaksesuaian antara produksi dan kebutuhan beban. Namun, tidak seluruh studi menyediakan profil beban dan data *excess electricity* secara eksplisit, sehingga diperlukan pendekatan estimasi pada tahap proyeksi.

3. METODOLOGI

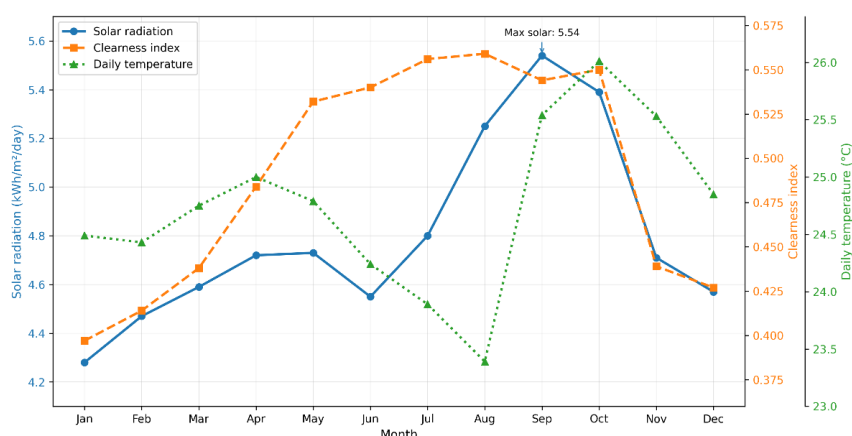
3.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan analitis eksploratif berbasis data sekunder, yang dikombinasikan dengan simulasi sistem energi menggunakan perangkat lunak HOMER Pro. Pendekatan ini dipilih karena penelitian bersifat kajian dasar yang bertujuan membangun pemahaman konseptual mengenai potensi pemanfaatan *excess electricity* PLTS atap untuk produksi *green hydrogen*, tanpa menitikberatkan pada aspek implementasi fisik secara langsung. Data yang digunakan seluruhnya bersifat sekunder, diperoleh dari hasil penelitian terdahulu yang telah dipublikasikan, data iradiasi surya dari perangkat lunak HOMER Energy, serta referensi teknis terkait teknologi *electrolyzer*. Secara keseluruhan, alur penelitian terdiri dari empat tahap utama yang saling berkaitan: (1) pengumpulan data, (2) simulasi sistem PLTS menggunakan HOMER untuk mengidentifikasi *excess electricity*, (3) perhitungan potensi produksi *green hydrogen* secara analitis, dan (4) analisis dan pembahasan hasil. Pendekatan ini memungkinkan estimasi kuantitatif yang sistematis dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah meskipun tanpa pengukuran lapangan secara langsung.

3.2 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari dua jenis utama, yaitu data iradiasi surya dan data profil sistem PLTS atap.

Data iradiasi surya diperoleh dari perangkat lunak HOMER Energy yang memuat data GHI wilayah Magelang pada koordinat $-7,47^{\circ}\text{LS}$, $110,22^{\circ}\text{BT}$. Data iradiasi ini mencakup profil harian dan bulanan sepanjang satu tahun dengan resolusi per jam, sehingga representatif untuk menangkap variabilitas produksi energi surya secara musiman di wilayah Magelang.



Gambar 2. Profil Iradiasi Surya Bulanan Wilayah Magelang (HOMER Energy)

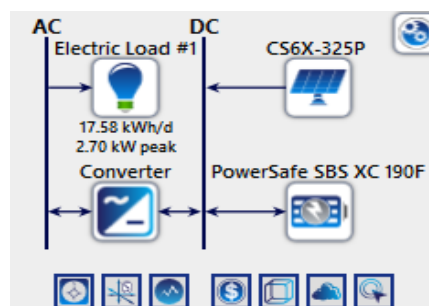
Berdasarkan data HOMER Energy, wilayah Magelang memiliki rata-rata GHI harian berkisar 4,28–5,54 kWh/m²/hari dengan nilai tertinggi pada September dan terendah pada Januari. Nilai *Clearness Index* cenderung lebih tinggi pada musim kemarau (Juni–Oktober) dibandingkan musim hujan (November–Maret), sementara suhu harian relatif stabil pada rentang 23,39–26,01°C sepanjang tahun. Kondisi ini

menunjukkan potensi produksi energi surya yang konsisten di wilayah Magelang sebagai basis data iradiasi dalam penelitian ini.

Data profil sistem PLTS atap diperoleh dari publikasi ilmiah [3] yang mengkaji perancangan dan simulasi sistem PLTS *off-grid* untuk kebutuhan energi LCD proyektor di Gedung FT02 Universitas Tidar, Kota Magelang [6]. Data yang diekstrak dari publikasi tersebut meliputi: (1) kapasitas sistem PLTS sebesar 14,6 kWp, (2) total produksi energi tahunan sebesar 20.638 kWh/tahun, (3) total kebutuhan beban aktual sebesar 6.414 kWh/tahun, (4) besaran *excess electricity* tahunan sebesar 13.841 kWh/tahun dari total produksi, serta (5) profil produksi dan *excess electricity* bulanan hasil simulasi HOMER Pro. Pemilihan sumber data ini didasarkan pada pertimbangan bahwa data telah terverifikasi melalui simulasi HOMER Pro, mencakup profil temporal yang lengkap, berlokasi spesifik di Kota Magelang dengan data iradiasi lokal yang representatif, dan telah dipublikasikan pada jurnal akademik yang terindeks.

3.3 Konfigurasi Simulasi HOMER Pro dan Identifikasi Excess Electricity

Identifikasi *excess electricity* pada penelitian ini dilakukan berdasarkan data simulasi HOMER Pro yang telah tersedia pada sumber data. Simulasi tersebut memodelkan sistem PLTS *off-grid* di Gedung FT02 Universitas Tidar dengan komponen utama berupa PV array, *converter*, bank baterai, dan beban listrik berupa LCD proyektor. Konfigurasi pemodelan sistem pada HOMER Pro disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Konfigurasi Pemodelan Sistem PLTS Off-Grid FT02 pada HOMER Pro

Gambar 3 menunjukkan konfigurasi pemodelan sistem PLTS *off-grid* yang digunakan sebagai dasar identifikasi *excess electricity*. Sistem dimodelkan dengan kapasitas PV sebesar 14,6 kWp, bank baterai sebagai media penyimpanan energi, *converter* untuk menghubungkan sisi DC dan AC, serta beban listrik AC berupa kebutuhan operasional LCD proyektor. Ringkasan hasil simulasi HOMER Pro pada sistem disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan Hasil Simulasi pada Sistem PLTS Off-Grid FT02 Universitas Tidar

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Kapasitas PV	14,6 kWp	Jumlah panel	46 unit
Tipe baterai	EnergyS PowerSafe SBS XC 190F	Jumlah baterai	24 unit
Kapasitas <i>converter</i>	2,9 kW	Beban listrik tahunan	6.414 kWh/tahun
Produksi energi PV	20.638 kWh/tahun	Energi masuk baterai	1.853 kWh/tahun
Energi keluar baterai	1.808 kWh/tahun	<i>Excess electricity</i>	13.841 kWh/tahun
<i>Excess fraction</i>	67,1%	<i>Renewable fraction</i>	100%

Berdasarkan Tabel 2, sistem PLTS *off-grid* menghasilkan produksi energi PV sebesar 20.638 kWh/tahun dengan beban listrik tahunan sebesar 6.414 kWh/tahun. Energi yang masuk dan keluar baterai masing-masing sebesar 1.853 kWh/tahun dan 1.808 kWh/tahun, sedangkan *excess electricity* mencapai 13.841

kWh/tahun atau 67,1% dari total produksi energi PV. Nilai *excess electricity* tersebut selanjutnya digunakan sebagai input utama dalam estimasi produksi *green hydrogen*. Secara matematis, *excess electricity* dapat dinyatakan sebagai [9]:

$$E_{\text{excess}}(t) = \max [0, E_{\text{PV}}(t) - E_{\text{load}}(t) - E_{\text{battery}}(t)] \quad (1)$$

Dengan $E_{\text{excess}}(t)$ adalah energi listrik berlebih pada periode waktu ke- t ; $E_{\text{PV}}(t)$ adalah energi listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS pada periode waktu ke- t ; $E_{\text{load}}(t)$ adalah energi listrik yang dikonsumsi oleh beban pada periode waktu ke- t ; dan $E_{\text{battery}}(t)$ adalah energi listrik yang masih dapat diserap atau disimpan oleh baterai pada periode waktu ke- t . Dalam formulasi tersebut, fungsi $\max [0, \cdot]$ digunakan agar nilai *excess electricity* tidak bernilai negatif. Apabila produksi PLTS lebih kecil atau sama dengan kebutuhan beban dan kapasitas penyimpanan baterai, maka nilai $E_{\text{excess}}(t)$ dianggap sama dengan nol.

3.4 Skema Sistem dan Perhitungan Potensi Produksi Green Hydrogen

Green hydrogen merupakan hidrogen yang diproduksi melalui proses elektrolisis air dengan memanfaatkan listrik yang bersumber dari energi terbarukan, sehingga tidak menghasilkan emisi karbon pada proses produksinya [3][17]. Dalam konteks integrasi dengan PLTS, *green hydrogen* diproduksi dengan memanfaatkan listrik hasil panel surya, termasuk *excess electricity* yang berpotensi terbuang, untuk menguraikan molekul air (H_2O) menjadi gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) melalui reaksi elektrokimia [18]. Reaksi dasar yang terjadi dalam proses ini adalah sebagai berikut:



Reaksi ini berlangsung di dalam sel elektrolisis yang terdiri dari dua elektroda, anoda dan katoda yang dialiri arus listrik searah (DC). Pada katoda terjadi reaksi reduksi yang menghasilkan gas hidrogen, sedangkan pada anoda terjadi reaksi oksidasi yang menghasilkan gas oksigen. Energi listrik yang dibutuhkan untuk memecah ikatan molekul air secara teoritis adalah sebesar 39,4 kWh per kilogram hidrogen yang dihasilkan [17]. Dalam kondisi operasi praktis, kebutuhan energi aktual untuk produksi 1 kg H_2 lebih tinggi dari nilai teoritis tersebut karena adanya rugi-rugi elektrokimia dan termal pada sistem *electrolyzer*. *Specific Energy consumption* (SEC) aktual bergantung pada jenis dan efisiensi teknologi yang digunakan [19].

Saat ini terdapat dua teknologi *electrolyzer* utama yang paling umum digunakan untuk produksi *green hydrogen* skala kecil hingga menengah, yaitu *Alkaline Water Electrolyzer* (AWE) dan *Proton Exchange Membrane* (PEM) *electrolyzer*. *Alkaline electrolyzer* merupakan teknologi yang paling matang secara komersial, menggunakan larutan elektrolit alkali, umumnya kalium hidroksida (KOH), sebagai media penghantar ion. Keunggulan utamanya adalah biaya investasi yang relatif rendah dan daya tahan yang baik, namun memiliki batas beban minimum operasional sekitar 20% sehingga kurang fleksibel untuk sumber energi yang fluktuatif seperti PLTS. Sementara itu, PEM *electrolyzer* menggunakan membran polimer padat sebagai elektrolit dengan batas beban minimum hanya sekitar 5%, menjadikannya lebih responsif terhadap fluktuasi input daya dari PLTS. Kelemahan utama PEM adalah biaya investasi yang lebih tinggi akibat penggunaan material katalis berbasis logam mulia. Nilai konsumsi energi spesifik kedua teknologi ini masing-masing adalah 48 kWh/kg H_2 untuk PEM dan 50 kWh/kg H_2 untuk AWE [17] [19].

Selain dua teknologi utama tersebut, terdapat alternatif yang lebih sederhana dan terjangkau yang relevan untuk skala PLTS atap kecil, yaitu generator gas HHO (*oxyhydrogen*). Berbeda dengan PEM

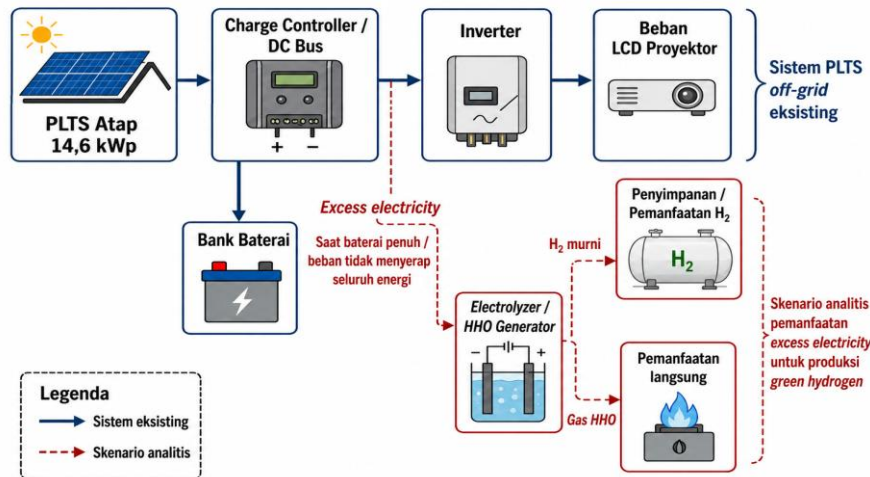
dan AWE yang memisahkan H_2 murni di satu sisi dan O_2 di sisi lain, generator HHO menghasilkan gas campuran hidrogen dan oksigen dalam rasio molar 2:1 (66,6% H_2 dan 33,3% O_2) secara langsung dalam satu aliran tanpa pemisahan. Gas HHO ini dapat dimanfaatkan secara *on-demand* untuk berbagai aplikasi pembakaran langsung seperti mesin pembakaran internal, pengelasan, dan pemanasan. Studi pada generator HHO tipe *dry cell* menunjukkan bahwa kondisi operasional optimal berada pada tegangan 11,5–12,0 V dengan konsentrasi KOH 0,05–0,10 M, menghasilkan produktivitas tertinggi 343,9 cm^3 /menit dengan efisiensi konversi energi mencapai 53,79%. Karakteristik tegangan operasional ini sangat kompatibel dengan *output* tegangan DC sistem PLTS atap berskala kecil [20]. Perbandingan komprehensif ketiga teknologi *electrolyzer* berdasarkan parameter teknis utama disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Teknologi *Electrolyzer* Untuk Produksi Hidrogen

Parameter	PEM <i>Electrolyzer</i>	Alkaline (AWE)	HHO Generator
<i>Output</i> gas	H_2 murni + O_2 terpisah	H_2 murni + O_2 terpisah	Gas campuran HHO ($H_2:O_2 = 2:1$)
Konsumsi energi spesifik	48,1 – 57,5 kWh/kg H_2	50 – 53,4 kWh/kg H_2	58 – 90 kWh/kg H_2^*
Beban minimum operasi	~5% (sangat fleksibel)	~20% (kurang fleksibel)	<i>On-demand</i>
Respons fluktuasi daya	Sangat baik	Sedang	Baik (langsung dari DC)
Penyimpanan produk	Tangki H_2 bertekanan	Tangki H_2 bertekanan	Tidak dapat disimpan jangka panjang
Biaya investasi	Tinggi (katalis logam mulia)	Rendah–sedang	Rendah (material lokal)
Kematangan teknologi	Komersial (TRL 9)	Komersial (TRL 9)	Skala kecil / eksperimental
Kompatibilitas tegangan PLTS	Perlu sistem kontrol	Perlu sistem kontrol	Langsung 12–48 VDC
Aplikasi utama	Industri, transportasi, penyimpanan	Industri skala besar, <i>baseload</i>	Pembakaran langsung, pengelasan

Meskipun demikian, generator gas HHO memiliki keterbatasan dibandingkan teknologi PEM dan AWE, terutama karena gas yang dihasilkan berupa campuran dan tidak dapat disimpan jangka panjang dalam tangki bertekanan seperti H_2 murni. Oleh karena itu, dalam kajian ini generator gas HHO diposisikan sebagai opsi alternatif skala kecil yang relevan untuk sistem PLTS atap residensial dengan kapasitas terbatas, sementara teknologi PEM dan AWE tetap menjadi pilihan utama untuk sistem dengan kapasitas yang lebih besar dan kebutuhan penyimpanan hidrogen jangka panjang [18][19]. Berdasarkan karakteristik ketiga teknologi tersebut, perhitungan potensi produksi hidrogen dalam penelitian ini tidak dimaksudkan untuk memilih satu teknologi terbaik secara definitif, melainkan untuk membandingkan rentang potensi produksi H_2 yang dapat diperoleh apabila *excess electricity* dari sistem PLTS dimanfaatkan melalui skenario PEM, AWE, dan HHO. Oleh karena itu, pendekatan perhitungan dilakukan berdasarkan *specific energy consumption* (SEC) masing-masing teknologi.

Mengingat keterbatasan HOMER *Pro* dalam memodelkan produksi hidrogen secara langsung dari *excess electricity* tanpa konfigurasi *hydrogen load* yang eksplisit [21], perhitungan potensi produksi *green hydrogen* dalam penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan analitis berbasis persamaan konversi energi. Pendekatan ini secara konseptual setara dengan simulasi, namun lebih transparan dan mudah diverifikasi secara independen. Untuk memperjelas hubungan antara sistem PLTS *off-grid* eksisting dan skenario analitis produksi hidrogen, skema konseptual sistem disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema Pemanfaatan Excess Electricity Sistem PLTS Off-Grid untuk Produksi Green Hydrogen

Gambar 4 menunjukkan bahwa sistem PLTS *off-grid* eksisting terdiri atas PLTS atap 14,6 kWp, *charge controller*/DC bus, bank baterai, inverter, dan beban LCD proyektor. Pada kondisi normal, energi listrik yang dihasilkan PLTS digunakan untuk melayani beban dan mengisi baterai. Ketika baterai telah penuh dan beban tidak menyerap seluruh energi yang tersedia, sebagian energi yang dihasilkan menjadi *excess electricity*. Dalam penelitian ini, *excess electricity* tersebut diperlakukan sebagai input energi pada skenario analitis produksi *green hydrogen* melalui *electrolyzer* atau HHO generator. Jalur garis penuh pada Gambar 4 menunjukkan sistem PLTS *off-grid* eksisting, sedangkan jalur garis putus-putus menunjukkan skenario analitis pemanfaatan *excess electricity* untuk produksi hidrogen. Perhitungan matematis potensi produksi hidrogen dilakukan menggunakan Persamaan (3):

$$m_{H_2}(t) = \frac{E_{\text{excess}}(t)}{SEC_{EL}} \quad (3)$$

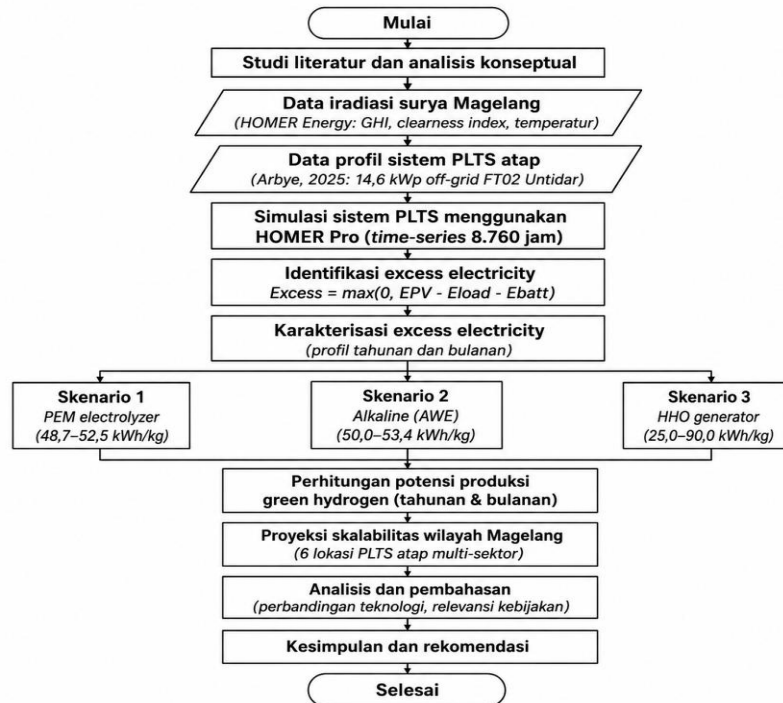
Dengan $m_{H_2}(t)$ adalah massa hidrogen yang dapat diproduksi pada periode waktu ke- t (kg); $E_{\text{excess}}(t)$ adalah energi listrik berlebih yang tersedia pada periode waktu ke- t (kWh); dan SEC_{EL} adalah konsumsi energi spesifik *electrolyzer* untuk memproduksi satu kilogram hidrogen (kWh/kg H₂). Apabila perhitungan dilakukan untuk seluruh periode simulasi, maka total potensi produksi hidrogen dapat dihitung dengan menjumlahkan produksi hidrogen pada setiap periode waktu, seperti yang disajikan pada Persamaan (4) sebagai berikut:

$$M_{H_2} = \sum_{t=1}^n \frac{E_{\text{excess}}(t)}{SEC_{EL}} \quad (4)$$

Dengan M_{H_2} adalah total massa hidrogen yang dapat diproduksi selama periode analisis (kg), dan n adalah jumlah periode waktu yang dianalisis. Perhitungan potensi produksi *green hydrogen* dilakukan secara komparatif pada tiga skenario teknologi *electrolyzer*, yaitu PEM *electrolyzer*, alkaline *electrolyzer* (AWE), dan HHO generator, dengan parameter konsumsi energi spesifik mengacu pada rentang nilai yang telah disajikan pada Tabel 3. Untuk setiap skenario, perhitungan dilakukan menggunakan nilai minimum dan maksimum sehingga diperoleh rentang estimasi produksi H₂. Pendekatan ini digunakan untuk menunjukkan sensitivitas hasil terhadap variasi performa *electrolyzer*, baik pada level tahunan maupun bulanan.

3.5 Diagram Alir Penelitian

Alur keseluruhan tahapan penelitian dari pengumpulan data hingga analisis hasil disajikan pada Gambar 5. Diagram alir ini menggambarkan keterkaitan antar tahapan secara sistematis, mulai dari input data iradiasi dan profil beban, proses simulasi HOMER untuk identifikasi *excess electricity*, hingga perhitungan analitis potensi produksi *green hydrogen* untuk tiga skenario teknologi.



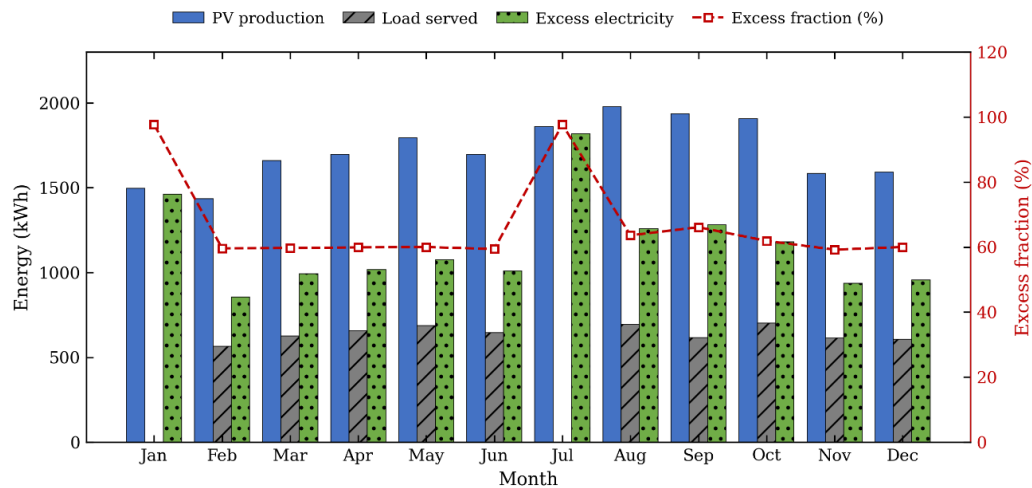
Gambar 5. Diagram alir penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Excess Electricity Objek Kajian

Berdasarkan Persamaan (1), identifikasi *excess electricity* dilakukan terhadap data simulasi HOMER Pro sistem PLTS *off-grid* FT02 Universitas Tidar, dengan memperhitungkan selisih antara produksi energi PV, konsumsi beban, dan kapasitas penyimpanan baterai pada setiap periode waktu. Analisis profil bulanan menunjukkan bahwa *excess electricity* terjadi secara konsisten sepanjang tahun tanpa pengecualian, dengan proporsi yang sangat signifikan terhadap total produksi. Profil bulanan produksi PV, beban terlayani, dan *excess electricity* disajikan pada Gambar 6.

Berdasarkan Gambar 6, terdapat dua pola karakteristik *excess electricity* yang berbeda secara signifikan sepanjang tahun. Pertama, pada bulan Januari dan Juli, *excess electricity* mencapai 97,7% dari total produksi karena beban aktual bernilai nol akibat libur semester di Universitas Tidar sehingga tidak ada operasional LCD proyektor. Pada kedua bulan tersebut, seluruh energi yang dihasilkan PLTS tidak dapat diserap oleh beban manapun dan sepenuhnya menjadi surplus yang diarahkan ke *dump load*. Kedua, pada bulan-bulan aktif perkuliahan (Februari–Juni dan Agustus–Desember), *excess electricity* berada pada rentang 59,2–66,1% dari produksi bulanan dengan rata-rata sekitar 62% per bulan. Dari sisi besaran absolut, *excess electricity* tertinggi terjadi pada bulan Juli (1.817,48 kWh), bukan karena iradiasi lebih tinggi melainkan karena absennya beban akibat libur semester. Sebaliknya, *excess electricity* terendah terjadi pada November (937,38 kWh), yang merupakan kombinasi dari iradiasi yang lebih rendah pada periode akhir tahun dengan beban perkuliahan yang aktif. Rentang antara nilai tertinggi dan terendah mencapai 880,10 kWh (rasio 1,94), menunjukkan variabilitas bulanan yang cukup signifikan.



Gambar 6. Profil Bulanan Produksi PV, Beban, dan Excess Electricity Objek Penelitian

Pada bulan-bulan aktif perkuliahan, pola *excess electricity* lebih dipengaruhi variasi iradiasi surya dibandingkan variasi beban, terlihat dari relatif stabilnya beban bulanan pada kisaran 535–702 kWh sementara produksi PV bervariasi lebih lebar antara 1.434–1.977 kWh. Bulan Agustus–September mencatat produksi PV tertinggi dalam periode aktif, berkorelasi dengan nilai GHI yang lebih tinggi pada musim kemarau sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Kondisi ini menunjukkan bahwa *excess electricity* pada sistem PLTS *off-grid* FT02 Untidar bukan merupakan kejadian sesaat, melainkan muncul secara berulang akibat ketidaksesuaian antara kapasitas produksi PLTS, profil kebutuhan beban, dan kemampuan penyimpanan baterai. Dengan kata lain, energi berlebih tersebut tidak dapat dieliminasi hanya melalui penyesuaian jadwal operasional beban, tetapi memerlukan strategi pemanfaatan tambahan, salah satunya melalui konversi energi surplus menjadi *green hydrogen*. Secara keseluruhan, dapat dikonfirmasi bahwa sistem ini memiliki potensi *excess electricity* sebesar 13.841 kWh/tahun (67,1% dari total produksi), bersifat konsisten dan terdistribusi sepanjang tahun, karakteristik yang sangat mendukung pemanfaatannya sebagai sumber energi produksi *green hydrogen* secara berkelanjutan.

4.2 Potensi Produksi Green Hydrogen

Berdasarkan data *excess electricity* yang telah diidentifikasi, perhitungan potensi produksi *green hydrogen* dilakukan menggunakan Persamaan (3) dan (4) untuk tiga skenario teknologi *electrolyzer*: PEM *electrolyzer* (SEC = 48,1–57,5 kWh/kg H₂), Alkaline (AWE) (SEC = 50,0–53,4 kWh/kg H₂), dan HHO generator (SEC = 58,0–90,0 kWh/kg H₂). Hasil perhitungan tahunan dan profil bulanan disajikan pada Tabel 4 dan Gambar 7.

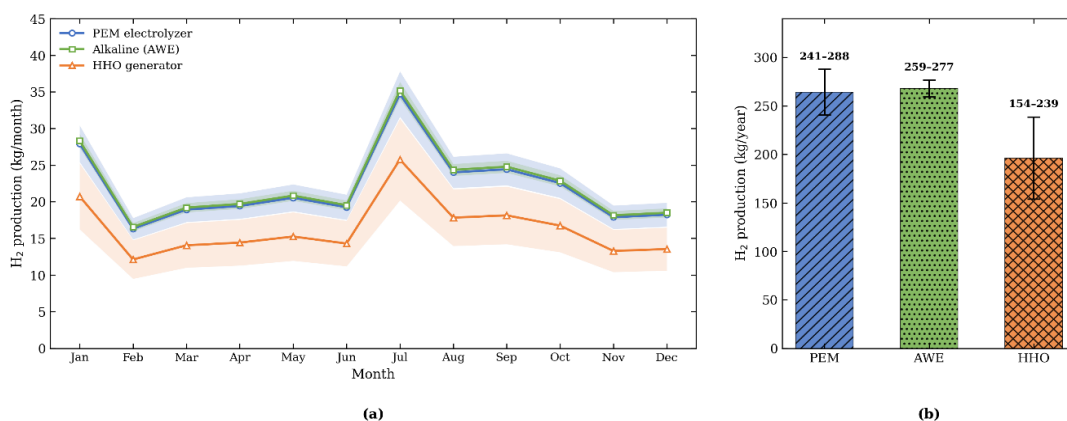
Tabel 4. Estimasi Produksi Green Hydrogen Tahunan Berdasarkan Excess Electricity Sistem PLTS FT02

Skenario	Teknologi	SEC (kWh/kg H ₂)	Produksi H ₂ (kg/tahun)	Produksi H ₂ (kg/hari)
1	PEM <i>electrolyzer</i>	48,1–57,5	240,71–287,75	0,66–0,79
2	Alkaline (AWE)	50,0–53,4	259,19–276,82	0,71–0,76
3	HHO generator	58,0–90,0	153,79–238,64	0,42–0,65

Secara tahunan, dengan total *excess electricity* sebesar 13.841 kWh/tahun, estimasi produksi hidrogen untuk masing-masing skenario adalah sebagai berikut: skenario PEM menghasilkan rentang 240,71–287,75 kg H₂/tahun (0,66–0,79 kg/hari), skenario AWE menghasilkan 259,19–276,82 kg H₂/tahun

(0,71–0,76 kg/hari), dan skenario HHO menghasilkan 153,79–238,64 kg H₂/tahun (0,42–0,65 kg/hari). Skenario PEM memberikan batas atas produksi tertinggi (287,75 kg/tahun) karena memiliki nilai SEC terendah, sementara skenario AWE menunjukkan rentang yang paling sempit (17,63 kg selisih antara nilai minimum dan maksimum), mengindikasikan konsistensi performa yang lebih tinggi dibandingkan kedua teknologi lainnya.

Profil bulanan produksi hidrogen untuk ketiga skenario disajikan pada Gambar 7(a), di mana area berwarna merepresentasikan rentang produksi antara nilai SEC minimum dan maksimum, sementara garis tengah menunjukkan estimasi pada nilai SEC rata-rata. Pola produksi bulanan mengikuti profil *excess electricity* sebagaimana diharapkan, bulan Juli mencatat produksi tertinggi untuk semua skenario (PEM: 31,61–37,79 kg; AWE: 34,04–36,35 kg; HHO: 20,19–31,34 kg), sedangkan November mencatat produksi terendah (PEM: 16,30–19,49 kg; AWE: 17,55–18,75 kg; HHO: 10,42–16,16 kg). Perbandingan total produksi tahunan antar skenario dengan rentang sensitivitasnya ditunjukkan pada Gambar 7(b). Temuan penting dari analisis ini adalah bahwa rentang sensitivitas skenario HHO jauh lebih lebar (selisih 84,85 kg) dibandingkan PEM (47,04 kg) dan AWE (17,63 kg). Lebarnya rentang HHO disebabkan oleh variabilitas performa *generator* HHO yang masih berskala eksperimental, di mana efisiensi konversi sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional seperti konsentrasi elektrolit dan tegangan input [20]. Sebaliknya, sempitnya rentang AWE menunjukkan bahwa teknologi ini memiliki kematangan dan konsistensi performa tertinggi di antara ketiga opsi, menjadikannya pilihan yang paling *predictable* untuk perencanaan sistem.



Gambar 7. Potensi Produksi Green Hydrogen: (a) Profil Bulanan Per Skenario Teknologi; (b) Perbandingan Total Tahunan Antar Skenario

Meskipun demikian, dari perspektif kelayakan implementasi pada skala PLTS atap kecil seperti objek kajian ini, skenario HHO memiliki keunggulan pada aspek biaya investasi yang rendah dan kompatibilitas tegangan langsung dengan output DC panel surya tanpa memerlukan sistem kontrol tambahan. Sementara itu, skenario PEM dan AWE lebih unggul pada aspek kapasitas produksi dan kemampuan penyimpanan hidrogen jangka panjang. Pemilihan teknologi yang optimal perlu mempertimbangkan keseimbangan antara besaran produksi, biaya investasi, dan kebutuhan aplikasi di wilayah Magelang.

4.3 Proyeksi Skalabilitas dan Perbandingan dengan Studi Sejenis

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa sistem PLTS *off-grid* berkapasitas 14,6 kWp di FT02 Universitas Tidar memiliki potensi produksi *green hydrogen* sebesar 240,71–287,75 kg H₂/tahun (skenario PEM), 259,19–276,82 kg H₂/tahun (skenario AWE), atau 153,79–238,64 kg H₂/tahun

(skenario HHO). Meskipun besaran ini relatif kecil dibandingkan skala industri, temuan ini memiliki implikasi penting terkait potensi skalabilitas jika pendekatan serupa diterapkan pada sistem PLTS atap lain yang telah dikaji di wilayah Magelang. Proyeksi potensi produksi *green hydrogen* pada enam sistem PLTS atap di wilayah Magelang disajikan pada Tabel 5. Proyeksi ini dilakukan sebagai estimasi indikatif untuk menggambarkan skala awal potensi pemanfaatan *excess electricity*, bukan sebagai nilai final hasil simulasi rinci pada masing-masing lokasi. Untuk lokasi FT02 Untidar, nilai *excess electricity* menggunakan output simulasi HOMER Pro sebesar 13.841 kWh/tahun. Untuk FT03 Untidar, estimasi mengacu pada data literatur yang melaporkan energi ekspor atau energi berlebih sebesar 99.216 kWh/tahun.

Tabel 5. Proyeksi Potensi Produksi Green Hydrogen pada Sistem PLTS Atap di Wilayah Magelang

No	Lokasi PLTS	Sektor	Kapasitas (kWp)	Estimasi Excess (kWh/tahun)	Produksi H ₂ PEM (kg/tahun)	Produksi H ₂ AWE (kg/tahun)
1	FT02 Untidar	Pendidikan	14,6	13.841	241 – 288	259 – 277
2	FT03 Untidar	Pendidikan	124,74	99.216	1.725 – 2.063	1.858 – 1.984
3	FT01 Untidar	Pendidikan	32	17.877	311 – 372	335 – 358
4	Kantor Dinas P&K	Pemerintah	—	42.558	740 – 885	797 – 851
5	Atria Hotel	Hotel	4,58	3.994	69 – 83	75 – 80
6	Rumah tinggal	Residensial	0,846	774	13 – 16	14 – 15
TOTAL				178.260	3.099 – 3.707	3.338 – 3.565

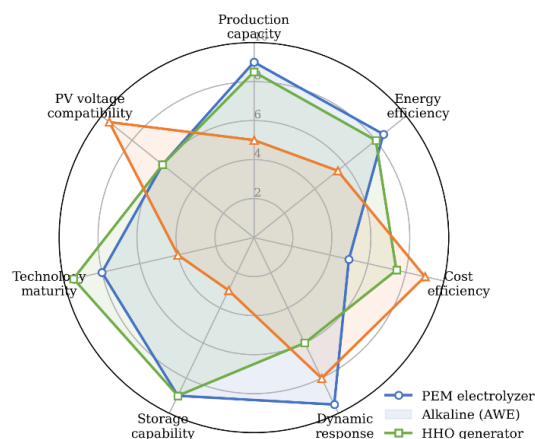
Sementara itu, untuk empat lokasi lainnya yang belum menyediakan profil beban dan *excess electricity* secara eksplisit, estimasi dilakukan dengan mengalikan produksi energi tahunan terhadap *excess fraction* sebesar 60%, yaitu rata-rata rasio *excess electricity* pada bulan-bulan aktif objek kajian utama. Hasil proyeksi menunjukkan bahwa akumulasi *excess electricity* dari enam lokasi mencapai 178.260 kWh/tahun, dengan potensi produksi *green hydrogen* total sebesar 3.099–3.707 kg H₂/tahun untuk skenario PEM atau 3.338–3.565 kg H₂/tahun untuk skenario AWE. Kontributor terbesar berasal dari sistem PLTS FT03 Untidar berkapasitas 124,74 kWp yang menyumbang lebih dari separuh total potensi produksi. Dengan demikian, hasil proyeksi ini perlu dipahami sebagai gambaran awal skala potensi yang masih memerlukan validasi lebih lanjut melalui simulasi individual pada masing-masing lokasi, terutama karena penggunaan *excess fraction* tunggal pada lokasi dengan karakteristik beban yang berbeda merupakan penyederhanaan metodologis.

Tabel 6. Perbandingan Hasil Penelitian dengan Studi Sejenis

Parameter	Penelitian ini	Penelitian [8]	Penelitian [22]	Penelitian [23]
Lokasi	Magelang, Indonesia	Kandahar, Afghanistan	Irak	Wadi Dayqah Dam, Qurayat, Oman
Kapasitas PV	14,6 kWp	10 kWp	60 MWp	26,57 MWp
Sumber energi	<i>Excess electricity</i>	Total produksi PV	Total produksi PV	Total produksi PV
Energi input (kWh/tahun)	13.841	15.300	117.830.000	65.500.000
Teknologi	PEM / AWE / HHO	PEM	PEM & AWE	PEM
Produksi H ₂ (kg/tahun)	241 – 288 (PEM)	306,69 <i>tracking</i> ; 225,68 <i>fixed</i>	1.197.245 PEM; 1.110.029 AWE	826.624
Pendekatan	Analitis (SEC)	PVsyst + MATLAB	HOMER Pro	HOMER + PVsyst
Skala	PLTS atap kecil	PLTS atap kecil	Skala utilitas	Skala utilitas
Kebaruan	Pemanfaatan <i>excess electricity</i> spesifik	<i>Fixed vs tracking PV comparison</i>	<i>Techno-economic</i> multi-skenario	<i>Floating PV + H₂ integration</i>

Perbandingan hasil penelitian ini dengan studi sejenis di tingkat internasional disajikan pada Tabel 6. Secara umum, studi-studi pembandingan berfokus pada pemanfaatan total produksi PV untuk produksi hidrogen, sementara penelitian ini secara spesifik memanfaatkan *excess electricity* yang selama ini terbuang. Pendekatan ini memberikan kontribusi kebaruan karena tidak memerlukan kapasitas PLTS tambahan, cukup memanfaatkan surplus energi dari sistem eksisting. Studi oleh [8] pada sistem PV 10 kWp di Kandahar, Afghanistan menghasilkan performa yang sebanding [8], mengkonfirmasi validitas besaran produksi yang diperoleh dalam penelitian ini. Sementara itu, studi berskala utilitas seperti [22] di Irak menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas PV akan menghasilkan peningkatan produksi hidrogen secara linier.

Evaluasi komparatif ketiga teknologi *electrolyzer* berdasarkan tujuh parameter teknis utama divisualisasikan pada Gambar 8. Dari *radar chart* tersebut terlihat bahwa tidak ada satu teknologi yang unggul di semua parameter sekaligus. Teknologi PEM unggul pada aspek kapasitas produksi dan respons dinamis, menjadikannya pilihan terbaik untuk memaksimalkan produksi H₂ dari input daya yang berfluktuasi. Teknologi AWE menunjukkan keseimbangan terbaik antara efisiensi, biaya, dan kematangan teknologi, dengan rentang produksi paling sempit (selisih 17,63 kg atau 6,8% variasi) yang mengindikasikan konsistensi performa tertinggi. Sementara itu, HHO generator memiliki keunggulan signifikan pada aspek biaya investasi dan kompatibilitas tegangan langsung dengan output DC panel surya, namun terbatas pada kemampuan penyimpanan dan kematangan teknologi [20].



Gambar 8. Perbandingan Multi-Parameter Teknologi PEM, AWE, dan HHO Generator

4.4 Implikasi dan Keterbatasan Penelitian

Temuan penelitian ini memiliki relevansi terhadap arah kebijakan energi Indonesia. Pemerintah telah meluncurkan Strategi Hidrogen Nasional pada Desember 2023 dan Rencana Hidrogen dan Amonia Nasional (RHAN) pada Juni 2025 yang menargetkan konsumsi hidrogen 4,2 juta ton per tahun untuk sektor kelistrikan pada tahun 2060 [24]. Implementasi *roadmap* dirancang dalam tiga fase: Inisiasi (2025–2034), Pengembangan dan Integrasi (2035–2045), serta Akselerasi dan Keberlanjutan (2045–2060). Pada tahun 2026, Kementerian ESDM menetapkan target ketersediaan hidrogen hijau di pasar sebesar 200 ton per tahun [25]. Dalam konteks fase inisiasi, pemanfaatan *excess electricity* dari PLTS atap yang tersebar di berbagai lokasi, termasuk di wilayah Magelang, menawarkan model produksi hidrogen berskala kecil dan terdistribusi yang tidak memerlukan investasi infrastruktur baru secara masif. Perubahan regulasi melalui Permen ESDM Nomor 2 Tahun 2024 yang menghapus skema *net metering* semakin memperkuat urgensi pencarian alternatif pemanfaatan *excess electricity* [7].

Beberapa keterbatasan pada penelitian ini juga perlu diakui secara transparan. Pertama, perhitungan produksi hidrogen dilakukan menggunakan nilai SEC konstan, sementara efisiensi *electrolyzer* aktual

bervariasi terhadap fluktuasi daya, suhu operasional, dan degradasi komponen. Kedua, data berasal dari satu objek kajian dengan profil beban spesifik, sehingga generalisasi ke sektor lain memerlukan penyesuaian. Ketiga, analisis belum mencakup aspek tekno-ekonomis seperti *Levelized Cost of Hydrogen* (LCOH) dan analisis *payback period*. Keempat, faktor teknis seperti kebutuhan air murni, manajemen termal, serta infrastruktur penyimpanan dan distribusi hidrogen belum menjadi cakupan penelitian ini. Kelima, proyeksi *excess electricity* pada lokasi selain objek kajian utama menggunakan *excess fraction* tunggal (60%) yang belum tentu representatif untuk setiap konfigurasi dan pola beban yang berbeda, sehingga hasil proyeksi perlu diinterpretasikan sebagai estimasi awal yang memerlukan validasi lebih lanjut melalui simulasi individual di masing-masing lokasi. Keterbatasan ini membuka peluang penelitian lanjutan yang lebih komprehensif.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji potensi produksi *green hydrogen* berbasis *excess electricity* dari sistem PLTS atap di wilayah Magelang menggunakan pendekatan analitis berbasis data sekunder simulasi HOMER Pro. Beberapa kesimpulan utama dapat ditarik dari hasil penelitian ini. Fenomena *excess electricity* terbukti menjadi karakteristik yang konsisten pada sistem PLTS atap di wilayah Magelang, didukung potensi iradiasi surya rata-rata 4,28–5,54 kWh/m²/hari. Dapat ditunjukkan juga bahwa pemanfaatan *excess electricity* PLTS atap untuk produksi *green hydrogen* dapat menjadi strategi alternatif dalam meningkatkan nilai guna surplus energi surya, khususnya pada sistem dengan ketidaksesuaian antara produksi PLTS dan profil konsumsi beban. Sistem PLTS *off-grid* 14,6 kWp di Gedung FT02 Universitas Tidar menghasilkan *excess electricity* sebesar 13.841 kWh/tahun (67,1% dari total produksi), dengan distribusi yang konsisten sepanjang tahun. *Excess electricity* ini berpotensi menghasilkan 240,71–287,75 kg H₂/tahun (PEM), 259,19–276,82 kg H₂/tahun (AWE), atau 153,79–238,64 kg H₂/tahun (HHO). Teknologi AWE menunjukkan konsistensi performa terbaik, PEM memberikan produksi tertinggi, sedangkan HHO unggul pada aspek biaya dan kompatibilitas tegangan DC. Proyeksi pada enam lokasi PLTS atap di wilayah Magelang menghasilkan akumulasi *excess electricity* 178.260 kWh/tahun dengan potensi total 3.099–3.707 kg H₂/tahun (PEM), sejalan dengan target fase inisiasi Rencana Hidrogen dan Amonia Nasional 2025–2034. Penelitian lanjutan disarankan mencakup analisis tekno-ekonomis (*Levelized Cost of Hydrogen*), pemodelan dinamis efisiensi *electrolyzer*, dan perluasan cakupan objek kajian ke sektor industri dan fasilitas publik di wilayah Magelang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM), Universitas Tidar, atas dukungan pendanaan melalui hibah DIPA Tahun Anggaran 2026.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency (IEA), “World Energy Outlook 2023,” 2023.
- [2] Pemerintah Indonesia, *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2017 Tentang Rencana Umum Energi Nasional*. Indonesia, 2017.
- [3] S. Arbye, A. Aziizudin, A. Purnomo, D. A. Halim, C. W. Yogiswara, and S. D. H. Putra, “Analysis of Rooftop Solar Power Plant Development Potential in Magelang City : A Case Study of Office Buildings , Universities , And Hotels,” *J. Renew. Energy Mech.*, vol. 8, no. 01, pp. 10–26, 2025, doi: 10.25299/rem.2025.vol8(01).20775.
- [4] PLN UID Jawa Tengah & DIY, “Paparan PLTS Atap di Jawa Tengah & DIY,” Central Java Solar

- Day, 2021.
- [5] N. Hayati, A. S, A. Aziizudin, D. -, and T. E. S. Ceren, "Analysis of Energy Saving Potential Through Rooftop PV System Implementation at Atria Hotel, Magelang City," *Widyakala J. J. Pembang. Jaya Univ.*, vol. 12, no. 2, p. 189, 2025, doi: 10.36262/widyakala.v12i2.1510.
 - [6] A. S and F. Adriyanto, "Analysis of a solar photovoltaic system to support the energy requirements of liquid crystal display (LCD) projectors in the Faculty of Engineering Building 2, Universitas Tidar," *BALANGA J. Pendidik. Teknol. dan Kejur.*, vol. 13, no. 2 Juli-Desember 2025, pp. 1–5, 2025, doi: 10.37304/balanga.v13i1.17341.
 - [7] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia, *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 2 Tahun 2024 tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap Yang Terhubung Pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik Untuk Kepentingan Umum*. Indonesia, 2024.
 - [8] A. S. Irshad, A. Hilali, A. B. Ahmadullah, A. H. Zaray, and N. M. Muslih, "Techno-economic benchmarking of green hydrogen production using fixed and tracking PV systems: a PVsyst–MATLAB integrated analysis," *Sci. Rep.*, vol. 16, no. 1, p. 15620, Apr. 2026, doi: 10.1038/s41598-026-46077-w.
 - [9] M. A. Vaziri Rad, A. Kasaeian, X. Niu, K. Zhang, and O. Mahian, "Excess electricity problem in off-grid hybrid renewable energy systems: A comprehensive review from challenges to prevalent solutions," *Renew. Energy*, vol. 212, no. September 2022, pp. 538–560, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.05.073.
 - [10] A. A. Kurniawan, I. Nawawi, and B. Fatkhurrozi, "Perancangan PLTS Atap On-Grid Rumah Tinggal Di Kota Magelang Dengan Kapasitas 0,846 kWp," *Elektr. Borneo*, vol. 9, no. 2, pp. 44–48, 2023, doi: 10.35334/eb.v9i2.4422.
 - [11] M. Amrullah, D. Pravitasari, and S. Nisworo, "Potensi Pengurangan Emisi Gas Kabron dengan Perencanaan PLTS Atap pada Gedung Fakultas Teknik 03 Untidar," *J. Ilm. Multidisiplin*, vol. 2, no. 6, pp. 2501–2507, 2023.
 - [12] T. A. Ajiwiguna and M. R. Kirom, "Uninterrupted Electricity Supply using Off-Grid Solar PV Systems for Remote Areas," *Int. J. Technol.*, vol. 15, no. 5, p. 1561, Sep. 2024, doi: 10.14716/ijtech.v15i5.6089.
 - [13] S. Eka Putri, A. H. Yuwono, and E. A. Setiawan, "Techno-Economic Analysis of On-Grid Rooftop PV Systems Integrated with BESS for Meeting the Energy Needs of Residential EV Home Charging Customers in Jakarta," *Int. J. Recent Technol. Appl. Sci.*, vol. 7, no. 2, pp. 71–91, 2025, doi: 10.36079/lamintang.ijortas-0702.851.
 - [14] A. S, D. A. Halim, A. Riawan, and Z. 'Ayyasy, "Analisis Penyediaan Air Bersih Berkelanjutan di Kota Magelang Melalui Pemanfaatan Energi Surya Sampai Dengan Tahun 2033," *Din. J. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 1, pp. 12–22, Jun. 2025, doi: 10.33387/dinamik.v10i1.9939.
 - [15] A. Ibrahim, "Perencanaan teknis dan ekonomis rooftop solar panel sebagai energi alternatif pada gedung FT1 Untidar," Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Magelang, 2023.
 - [16] K. N. Amini, M. K. Ridwan, and W. Wilopo, "Optimization and Feasibility Analysis of Rooftop Solar Photovoltaic (PV) Power Generation System Design," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1381, no. 1, p. 012021, Aug. 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1381/1/012021.
 - [17] M. Chatenet *et al.*, "Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 51, no. 11, pp. 4583–4762, 2022, doi: 10.1039/D0CS01079K.
 - [18] A. Allouhi, "Management of photovoltaic excess electricity generation via the power to hydrogen concept: A year-round dynamic assessment using Artificial Neural Networks," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 41, pp. 21024–21039, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.262.

- [19] S. Kim, J. Park, and J. H. Lee, “Multi-technology co-optimization approach for sustainable hydrogen and electricity supply chains considering variability and demand scale,” *arXiv*. 2024, doi: 10.48550/arXiv.2406.00669.
- [20] A. M. Mousa, H. A. A. Sayed, K. A. M. Ali, N. S. Elkaoud, and W. A. E. Mahmoud, “Energy-conversion efficiency for producing oxy-hydrogen gas using a simple generator based on water electrolysis,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 25312, Oct. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-73534-1.
- [21] HOMER Energy, “HOMER Pro 3.15 Documentation: Electrolyzer,” 2023. <https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.15/electrolyzer.html>.
- [22] H. Munther, Q. Hassan, A. A. Khadom, and H. B. Mahood, “Evaluating the techno-economic potential of large-scale green hydrogen production via solar, wind, and hybrid energy systems utilizing PEM and alkaline electrolyzers,” *Unconv. Resour.*, vol. 5, no. July 2024, p. 100122, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.uncres.2024.100122.
- [23] K. Al Saadi and A. Ghosh, “Investigating the integration of floating photovoltaics (FPV) technology with hydrogen (H₂) energy for electricity production for domestic application in Oman,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 80, no. July, pp. 1151–1163, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.07.260.
- [24] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, “Peta Jalan Hidrogen dan Amonia Nasional (RHAN) 2025–2060,” *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia*, Jakarta, 2025.
- [25] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, “Sejalan dengan Program Asta Cita, Kementerian ESDM Kebut Pengembangan Ekosistem Hidrogen,” *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia*. 2026, [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/en/media-center/news-archives/sejalan-dengan-program-asta-cita-kementerian-esdm-kebut-pengembangan-ekosistem-hidrogen>.