

## Desain Sistem Hidrogen Hijau Dengan Sumber Listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Lombok

Parman<sup>a,\*</sup>, Mochammad Resha<sup>b</sup>, Jooned Hendrarsakti<sup>c</sup>, Firman Bagja Juangsa<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jl. Teknik Kimia, Keputih, Sukolilo, Surabaya, East Java 60111

<sup>b</sup>Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Jl. Prof. Dr. Ir. Sumantri Brojonegoro No.1, Kota Bandar Lampung, Lampung 35141

<sup>c</sup>Teknik Mesin Pascasarjana, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No.10, Kota Bandung, 40132 (022) 2500935

\*E-mail: parmanlotim@gmail.com

### Abstract

Hydrogen is a carbon-free energy source with significant potential as a sustainable energy carrier for the future. Green hydrogen production through renewable energy sources, such as Solar Power Plants (PLTS), offers high potential for decarbonizing various sectors and addressing climate change challenges. This research aims to design a hydrogen production system integrated with a PLTS system in Lombok. Using MATLAB Simulink, a model is utilized to simulate the potential for green hydrogen production using an off-grid PLTS. The study includes an analysis of the PLTS system design, an electrolyzer model, and an energy storage system. Solar radiation data from 2023 is used as the basis for the simulation. The simulation results show that a PLTS with a capacity of 2.33 MWp and a Proton Exchange Membrane (PEM) electrolyzer system with a power of 2 MW can produce 121,391 kg of hydrogen per year.

**Keywords:** Green Hydrogen, MATLAB Simulink, PLTS

### Abstrak

Hidrogen merupakan energi bebas karbon dengan potensi besar sebagai pembawa energi masa depan yang berkelanjutan. Produksi hidrogen hijau melalui sumber energi terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menawarkan potensi tinggi untuk dekarbonisasi berbagai sektor dan menjawab tantangan perubahan iklim. Penelitian ini bertujuan untuk membuat desain sistem produksi hidrogen yang terintegrasi dengan sistem PLTS di Lombok. Menggunakan aplikasi MATLAB Simulink, model digunakan untuk mensimulasikan potensi produksi hidrogen hijau menggunakan PLTS *off-grid*. Studi ini mencakup analisis desain sistem PLTS, model elektroliser, serta sistem penyimpanan energi. Data radiasi matahari dari tahun 2023 digunakan sebagai dasar simulasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa PLTS dengan kapasitas 2,33 MWp dan sistem elektroliser *Proton Exchange Membrane* (PEM) dengan daya 2 MW mampu menghasilkan 121.391 kg hidrogen per tahun.

**Kata kunci:** Hidrogen Hijau, MATLAB Simulink, PLTS

### 1. Pendahuluan

Hidrogen adalah sumber energi yang bebas karbon dan dianggap memiliki potensi besar sebagai pembawa energi di masa depan [1]. Peningkatan permintaan akan solusi energi ramah lingkungan untuk memitigasi perubahan iklim telah meningkatkan minat terhadap hidrogen hijau sebagai pembawa energi yang serbaguna dan berkelanjutan. Hidrogen hijau, yang diproduksi melalui elektrolisis dengan sumber energi terbarukan, menawarkan potensi yang menjanjikan untuk dekarbonisasi berbagai sektor seperti transportasi, industri, dan pembangkit listrik [2]. Jaringan mikro yang merupakan sistem energi lokal dengan sumber daya energi terdistribusi, memainkan peran penting dalam mengintegrasikan sumber energi terbarukan dan memungkinkan produksi dan pemanfaatan hidrogen ramah lingkungan secara efisien [3].

Teknologi produksi hidrogen *Proton Exchange Membrane* (PEM) cocok digunakan dalam konteks listrik yang terputus-putus pasokan karena respons dinamisnya yang cepat, dengan waktu start-up dan shutdown hanya dalam hitungan detik serta *ramp up* dan *ramp-down* penuh dalam satu detik [4]. Tekanan operasi elektroliser PEM komersial biasanya sekitar 30-40 bar, meskipun karena penggunaan elektrolit polimer padat, tekanan yang jauh lebih besar mungkin terjadi. Tekanan pada 80, 200, dan bahkan 350 bar kemungkinan besar terjadi, sehingga layak secara ekonomi, mengingat hilangnya kebutuhan kompresi pasca elektrolisis disarankan untuk mengkompensasi peningkatan biaya investasi elektroliser [5].

Penggunaan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dalam produksi hidrogen ramah lingkungan menawarkan beberapa keuntungan diantaranya PLTS menyediakan sumber listrik terbarukan dan berkelanjutan untuk proses elektrolisis. Menurut Agyekum et al. (2022), pasokan listrik yang optimal dengan strategi kontrol khusus sangat penting dalam produksi hidrogen ramah lingkungan melalui elektrolisis menggunakan PLTS [6].

Penggabungan PLTS dengan elektroliser menyediakan jalur produksi hidrogen yang berkelanjutan, memanfaatkan sifat energi matahari yang terputus-putus (intermiten) untuk menghasilkan hidrogen selama periode pembangkitan listrik berlebih. Integrasi ini memungkinkan pemanfaatan langsung energi matahari untuk elektrolisis, sehingga menghasilkan produksi hidrogen netral karbon [7].

Untuk mengeksplorasi potensi pengintegrasian sistem elektroliser dengan PLTS dalam menghasilkan hidrogen yang ramah lingkungan dari air limbah boiler, perlu diperkenalkan pendekatan baru terhadap produksi hidrogen yang berkelanjutan [8]. Dibutuhkan mengevaluasi berbagai konfigurasi PLTS untuk produksi energi dan hidrogen, dengan menekankan potensi kombinasi elektroliser dan PLTS *off-grid* yang mandiri [9]. Pendekatan ini menunjukkan keserbagunaan PLTS dalam mendukung produksi hidrogen ramah lingkungan secara independen dari jaringan listrik. Disamping itu juga, penelitian lain membahas aspek ekonomi produksi hidrogen hijau, menekankan faktor-faktor seperti biaya elektroliser dan listrik terbarukan dalam menentukan daya saing hidrogen hijau [10]. Integrasi PLTS dengan teknologi produksi hidrogen sangat penting untuk memajukan sektor hidrogen ramah lingkungan. Dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan seperti tenaga surya, hidrogen ramah lingkungan dapat diproduksi secara berkelanjutan, sehingga berkontribusi terhadap transisi global menuju perekonomian rendah karbon. Penelitian di masa depan harus fokus pada optimalisasi efisiensi dan efektivitas biaya sistem produksi hidrogen ramah lingkungan bertenaga PV untuk mempercepat penerapan pembawa energi ramah lingkungan ini.

Dalam mengoptimalkan produksi hidrogen dengan menggunakan sistem elektroliser dan sumber listrik dari PLTS, sebagai upaya untuk dekarbonisasi kawasan industri, penting untuk melakukan penurunan biaya produksi agar penerapan hidrogen yang ramah lingkungan dapat dilakukan secara luas [11]. Dalam mengatasi tantangan intermiten dari sumber daya terbarukan, dengan menggabungkan turbin angin dan PLTS dalam proses produksi hidrogen hijau, menjadi sebuah pilihan dalam merancang sistem pembangkit yang bersifat intermiten [12]. Oleh karena itu, studi membahas potensi dan kelayakan ekonomi sistem produksi tenaga surya menjadi hidrogen, dengan menekankan peran PLTS dalam pembangkitan hidrogen berkelanjutan sangat dibutuhkan [13].

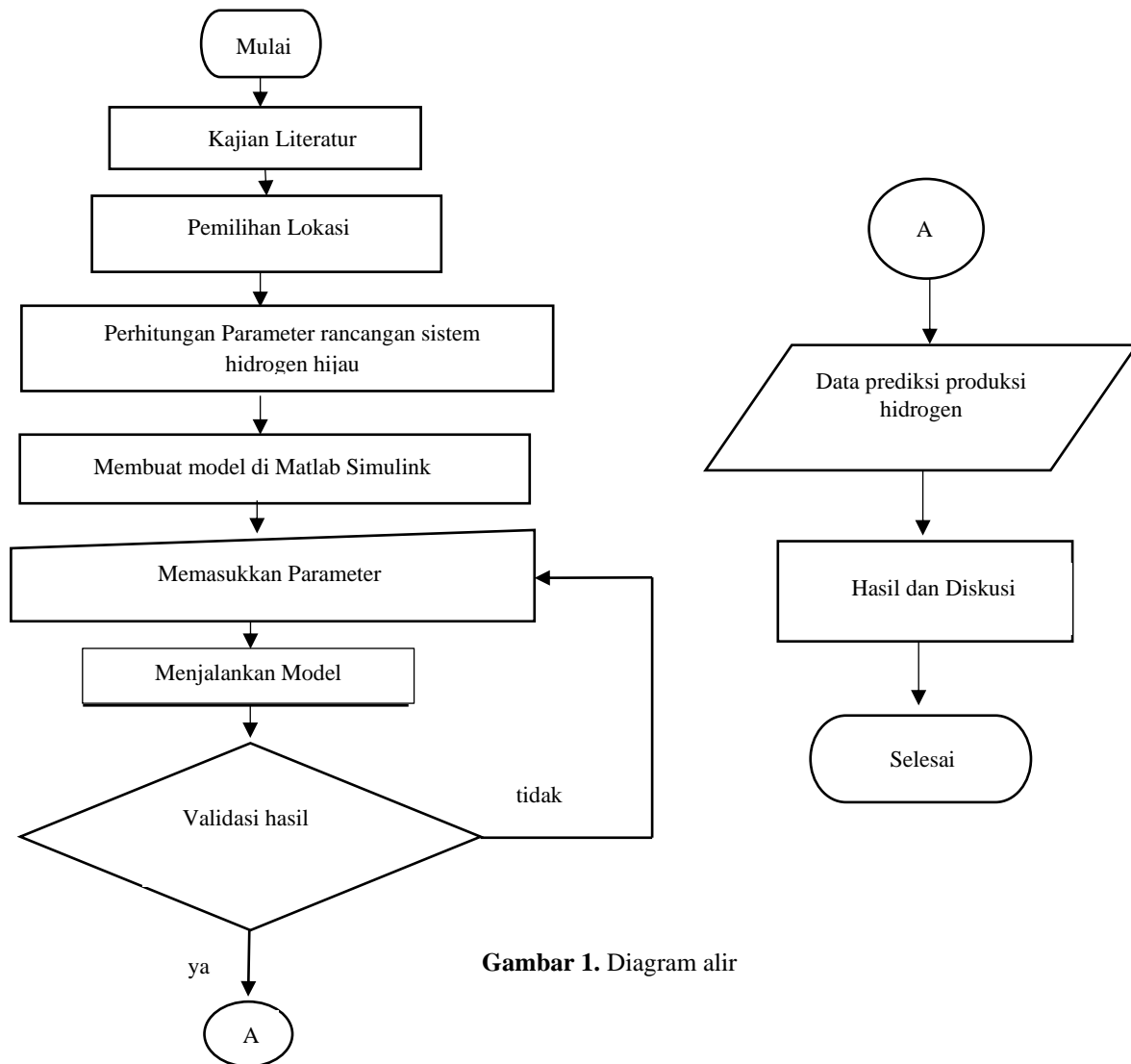
Produksi hidrogen hijau di jaringan mikro menggunakan model di MATLAB Simulink melibatkan berbagai aspek pemodelan dan simulasi. Penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi pemodelan komponen jaringan mikro seperti mesin berbahan bakar hidrogen, pembangkit listrik tenaga surya, dan turbin angin dalam aplikasi dari MATLAB Simulink [18]. Penelitian yang lain telah menyelidiki integrasi sumber energi terbarukan seperti pembangkit listrik tenaga angin dan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) untuk menghasilkan hidrogen hijau melalui elektrolisis air [19]. Simulasi ini sering kali menggabungkan strategi kontrol seperti kontrol inersia virtual dan kontrol prediktif model untuk menstabilkan frekuensi mikrogrid dan memastikan stabilitas sinyal [14], [15]. Disamping itu juga, studi telah diperluas ke sistem manajemen energi di jaringan mikro, memanfaatkan sistem multi-agen untuk manajemen terdistribusi dan manajemen energi *real-time* yang menggunakan kecerdasan buatan [16-17, 18].

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan tentang desain dan pengoperasian sistem produksi hidrogen ramah lingkungan yang optimal dalam memanfaatkan sumber energi PLTS di jaringan mikro Lombok, Nusa Tenggara Barat, Indonesia. Potensi wisata dan promosi energi ramah lingkungan cukup menjanjikan dengan secara rutin acara internasional diadakan di Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Mandalika, Lombok. Oleh karena itu, penentuan lokasi perancangan PLTS yang digunakan untuk produksi hidrogen hijau dipilih di KEK Mandalika yang didesain yang dilakukan bisa menjadi pertimbangan untuk pengembangan energi ramah lingkungan di Kawasan pusat industri wisata dan balapan motor GP di Indonesia.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Diagram alir penelitian

Diagram alir penelitian menjelaskan tentang langkah-langkah utama dalam desain sistem produksi hidrogen hijau berbasis PLTS menggunakan simulasi MATLAB Simulink. Proses dimulai dengan kajian literatur, diikuti oleh pemilihan lokasi dan perhitungan parameter desain sistem hidrogen hijau. Setelah parameter diperoleh, model dibuat menggunakan MATLAB Simulink, di mana parameter tersebut dimasukkan ke dalam model untuk menjalankan simulasi. Hasil simulasi kemudian divalidasi; jika tidak valid, parameter dimodifikasi dan simulasi dijalankan kembali. Jika hasilnya valid, data prediksi produksi hidrogen diperoleh dan dilanjutkan dengan tahap hasil dan diskusi, sebelum penelitian diakhiri.



Gambar 1. Diagram alir

## 2.2 Pemilihan lokasi

Penelitian ini menggunakan pendekatan model di aplikasi MATLAB Simulink untuk mengkaji potensi produksi hidrogen hijau dengan menggunakan jaringan mikro PLTS di Lombok, Nusa Tenggara Barat, Indonesia. Desain penelitian ini mencakup studi kelayakan teknis, desain sistem, simulasi dan analisis data. Lokasi penelitian terdapat pada area Sirkuit Mandalika yang ditunjukkan pada Gambar 2.



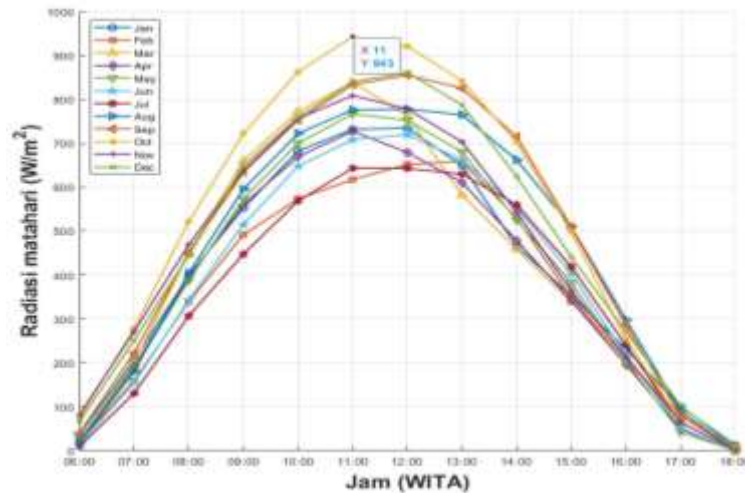
Gambar 2. Lokasi sistem hidrogen hijau

Tingkat radiasi matahari di KEK mandalika cukup tinggi dengan intensitas tertinggi mulai pukul 11:00 WITA hingga 13:00 WITA sekitar 890 W/m<sup>2</sup>. Curah hujan rendah sehingga memungkinkan proses produksi listrik dari PV tinggi. Rata-rata jumlah waktu radiasi matahari efektif selama 8 jam mulai dari jam 08:00 pagi hari

hingga 16:00 sore hari. Rentang suhu di KEK mandalika berada di sekitar 25 °C - 33 °C, hal ini menunjukkan potensi pembangkit listrik tenaga surya dapat bekerja optimal [19].

### 2.3 Parameter simulasi model

Sebelum menjalankan model simulasi, terlebih dahulu membuat parameter yang akan dimasukkan sebagai variabel di model yang telah dibuat. Parameter yang penting diantaranya data intensitas radiasi matahari. Data tersebut sebagai acuan simulasi model pembangkit listrik tenaga surya. Data intensitas radiasi matahari yang digunakan adalah data terdahulu yaitu intensitas radiasi matahari pada tahun 2023 (Gambar 3).



Gambar 3. Pola intensitas radiasi matahari per jam di lokasi terpilih[20]

Setelah memperoleh karakteristik radiasi di lokasi studi kasus, maka perlu melakukan perencanaan kapasitas PLTS yang akan dibangun. Kapasitas PLTS ditentukan oleh luas efektif area yang tersedia berdasarkan lokasi pembangunan. Dari informasi lokasi yang dipilih memiliki luas 16.380 m<sup>2</sup>, sementara itu luas efektif tanah untuk membangun PV power plant sekitar 75% dari luas total tanah tersebut yaitu 12.285 m<sup>2</sup> dan 25% dari luas total tanah yaitu 4.095 m<sup>2</sup> digunakan untuk operasional dan instalasi peralatan lain seperti elektroliser, inverter, baterai dan kantor.

Part specification	
Attribute	Value
Manufacturer	Amerisolar
Part number	AS_6M30_HC_320W
Part series	
Web link	<a href="http://www.weamerisolar.com/">http://www.weamerisolar.com/</a>
Part type	320.00W, Mono-crystalline Si, Half cell, Voc=40.20V, Isc=10.14A, Vm=33.40V, Im=9.59A, 1686X1002mm, 18.5kg
Parameterization date	06-Dec-2021
Parameterization note	Predefined parameterizations of Simscape components use available data sources for supplying parameter values
Part data file location	Sources\Solar_Cell\Amerisolar\AS_6M30_HC_320W.xml

Gambar 4. Spesifikasi modul PV yang digunakan

$$Luas\ Modul\ PV = panjang \times lebar \ (m^2) \tag{1}$$

$$Luas\ modul\ PV = 1,686\ m \times 1,002\ m = 1.69\ m^2$$

$$Jumlah\ modul\ PV = \frac{Luas\ tanah\ (m^2)}{Luas\ modul\ PV} \ (unit) \tag{2}$$

$$Luas\ tanah = 16.380\ m^2$$

Dengan mempertimbangkan tempat elektroliser, inverter dan baterai serta kantor maka luas efektif untuk modul PV adalah 75% dari luas tanah yaitu 12.285 m<sup>2</sup>. Jadi jumlah modul PV yang dibutuhkan sesuai dengan lokasi adalah sebagai berikut:

$$Jumlah\ modul\ PV = \frac{12285\ m^2}{1.69\ m^2} = 7.272\ unit$$

$$Daya\ PLTS = jumlah\ modul\ PV \times Daya\ PV\ per\ modul\ (Wp) \tag{3}$$

Berdasarkan Gambar 4 tentang spesifikasi modul PV yaitu daya per modul PV adalah 320 Wp. Maka daya PLTS adalah sebagai berikut:

$$Daya\ PLTS = 7272 \times 320\ Wp = 2327018.6\ Wp = 2.33\ MWp$$

**PEM Electrolyzers | HyLYZER® Series**

Product	H2 Flow (Nm³/h)	System efficiency (kWh/kg)	Equivalent power rating (MW)*	Output pressure (bar)	Outdoor / Indoor	Size Process module	Size Power module
HyLYZER® 200-30	200	≤ 55	1	30	Outdoor	40ft container	20ft container
HyLYZER® 250-30	250	≤ 55	1,25	30	Outdoor	40ft container	20ft container
HyLYZER® 400-30	400	≤ 54	2	30	Outdoor	40ft container	40ft container
HyLYZER® 500-30	500	≤ 54	2,5	30	Outdoor	40ft container	40ft container
HyLYZER® 1000-30	1000	≤ 51	5	30	Indoor	27.7ft x 7.5ft 8.5m x 2.3m	14.8ft x 8.2ft 4.5m x 2.5m
HyLYZER® 4000-30	4000	≤ 51	20	30	Indoor	50ft x 25ft 15.2m x 7.5m	23ft x 30ft 7m x 9m

The standard scope of supply for our electrolyzers differs between the outdoor and indoor products.

**Gambar 5.** Spesifikasi PEM elektroliser yang direkomendasikan

Jenis elektroliser dalam sistem hidrogen hijau yang dirancang adalah *Proton Exchange Membrane* (PEM). Elektroliser PEM paling cocok dipasang pada sistem produksi hijau dengan sumber energi listrik berasal dari pembangkit listrik tenaga surya karena periode *start-up* yang singkat, sehingga mampu mengatasi fluktuasi beban [21]. Berdasarkan kapasitas maksimal daya PV *power plant* yaitu 2,33 MWp maka daya elektroliser maksimal yang akan dipasang sekitar 2 MW. Gambar 5 memperlihatkan spesifikasi elektroliser yang cocok untuk sistem yang dirancang yaitu Hylizer 400-30 dengan *power rating* 2 MW dengan kapasitas produksi per jam adalah 400 Nm³/jam. Tegangan per cell dari masing-masing *cell* di elektroliser adalah  $V_{cell} = 2.4$  Volt [22]. Dengan efisiensi sistem dari PEM elektroliser berada di 56% - 60% [29]. Tegangan elektroliser terancang adalah 200 Volt berdasarkan model simulasi di sistem produksi hidrogen hijau terancang.

**Tabel 1.** Parameter elektroliser

No	Parameter	Keterangan	Referensi
1	Jenis Elektroliser	<i>Proton Exchange Membrane</i> (PEM)	dipilih
2	Sumber Energi Listrik	PLTS	dipilih
3	Power rating PLTS	2,33 MWp	dihitung
4	<i>Power rating</i> Elektroliser	2 MW	datasheet
5	Model Elektroliser	Hylizer 400-30	datasheet
6	Kapasitas Produksi Per Jam	400 Nm³/jam	datasheet
7	Tegangan per cell	2,4 V	[22]
8	Efisiensi Sistem	56% - 60%	[23]
9	Tegangan Elektroliser	200 V DC	dihitung
10	Arus Masuk	10.000 Ampere	dihitung
11	Jumlah cell	167 cell	dihitung
12	Densitas luas penampang per cell	0,01 A/cm²	[22]
13	Luas total cell	100 m²	dihitung
14	Dimensi Plate X dan Y	77 cm	dihitung
15	Dimensi Plate Z	167 cm	berdasarkan jumlah cell

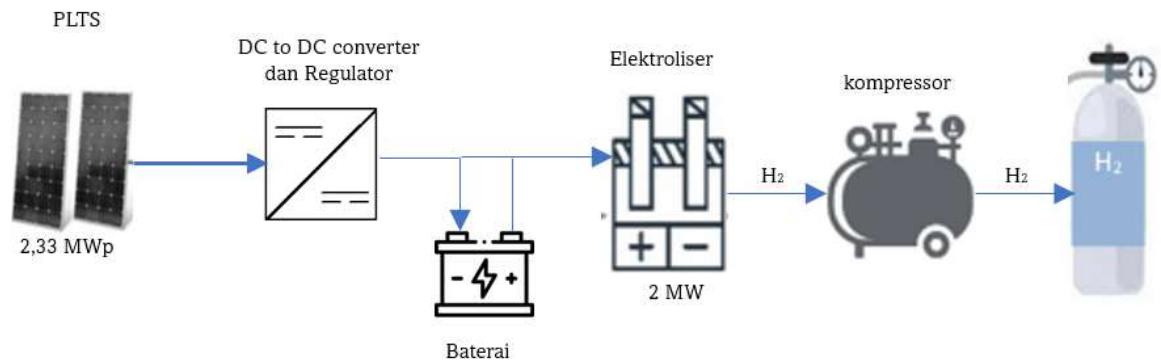
**Tabel 2.** Data sifat termofisika hidrogen [24]

No	Suhu (Kelvin)	Entalpi (kJ/kg)	Viskositas (s*µPa)	Konduktivitas (mW/kg/K)	Panas Spesifik (kJ/kg/K)
1	198,15	2532	6,77	132,4	13,57
2	223,15	2875	7,34	146,8	13,87
3	248,15	3224	7,88	160,5	14,08
4	273,15	3578	8,42	173,4	14,23

5	298,15	3936	8,94	185,6	14,33
6	323,15	4295	9,44	197,5	14,4
7	348,15	4655	9,93	210,1	14,45
8	373,15	5017	10,41	222	14,47

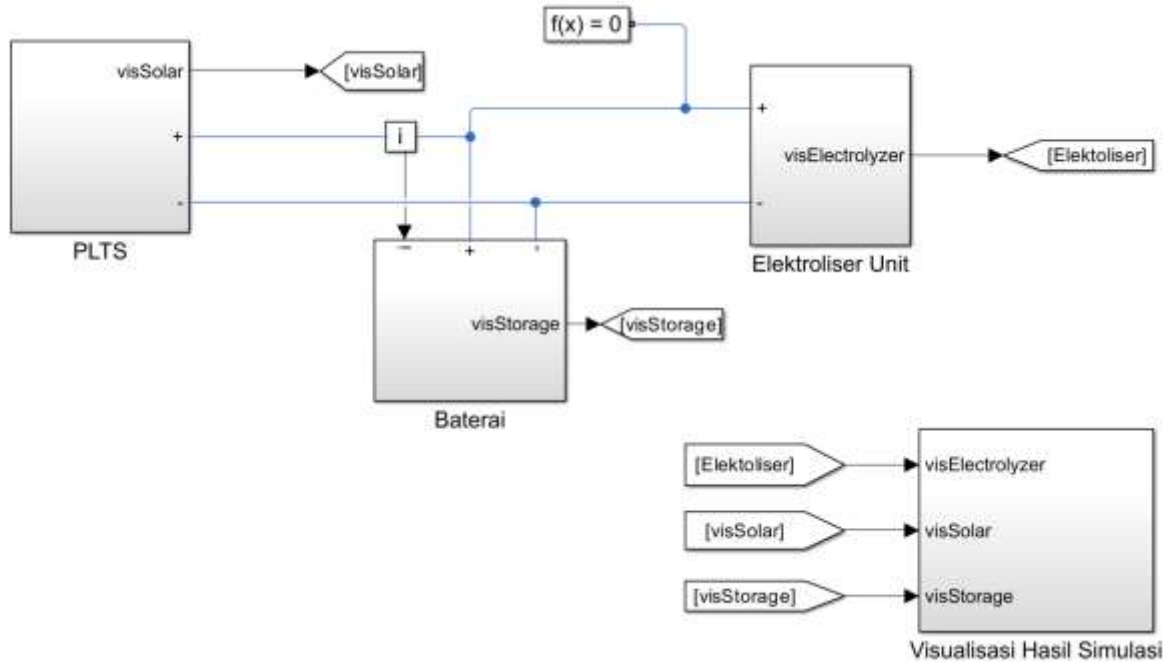
### 2.4 Model sistem hidrogen hijau

Sistem ini terdiri dari PLTS dengan kapasitas 2,33 MWp menghasilkan listrik yang kemudian diatur melalui DC to DC converter dan regulator. Sebagian energi tersebut disimpan dalam sistem penyimpanan energi, sementara sisanya digunakan untuk mengoperasikan elektroliser dengan kapasitas 2 MW. Elektroliser ini mengkonversi air menjadi hidrogen ( $H_2$ ) dan oksigen melalui proses elektrolisis. Hidrogen yang dihasilkan kemudian dikompresi menggunakan kompresor sebelum akhirnya disimpan dalam tangki penyimpanan hidrogen untuk keperluan lebih lanjut. Skema model sistem hidrogen hijau ditunjukkan pada Gambar 6 yang menjelaskan alur produksi hidrogen menggunakan energi dari pembangkit listrik tenaga surya (PLTS).



Gambar 6. Skema model sistem hidrogen hijau

Gambar 7 menjelaskan tentang alur produksi hidrogen hijau model di Matlab Simulink menggunakan energi surya dan sistem penyimpanan energi. Alur dimulai dari pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang mengumpulkan energi matahari dan mengubahnya menjadi listrik. Listrik ini kemudian disalurkan ke unit elektrolisis (Elektroliser Unit) dan penyimpanan energi (Baterai). Listrik yang dihasilkan dari PLTS dapat langsung digunakan oleh unit elektrolisis untuk memisahkan air menjadi hidrogen dan oksigen, atau disimpan terlebih dahulu dalam sistem penyimpanan energi untuk digunakan nanti.



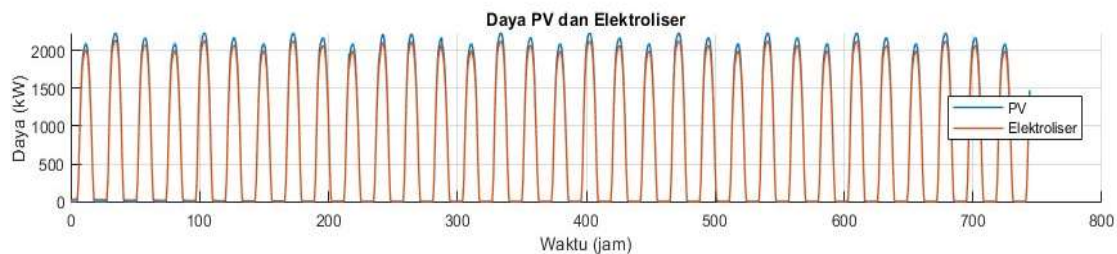
Gambar 7. Diagram blok sistem hidrogen hijau di Matlab Simulink

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi yang dilakukan dengan *time step* radiasi matahari rata-rata tiap bulan dan radiasi per hari *time step* per jam. Parameter input dari proses simulasi ada yang dihitung menyesuaikan berdasarkan luas lokasi tanah yang tersedia seperti jumlah solar panel (PV), ukuran elektroliser dan kebutuhan kapasitas baterai serta jumlah baterai *cell*. Ada juga yang ditetapkan berdasarkan data referensi seperti karakteristik hidrogen, temperatur kerja elektroliser, efisiensi elektroliser dan lain-lain.

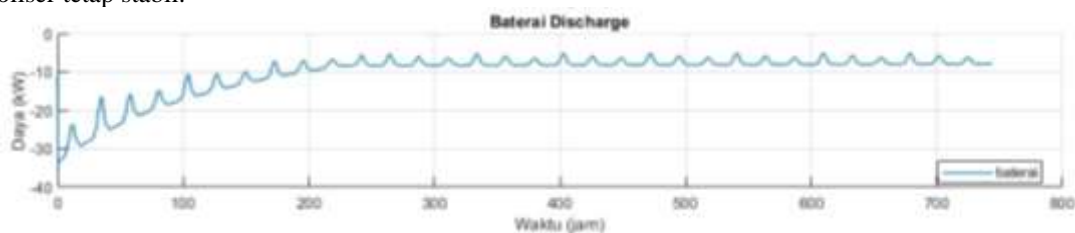
Tahapan utama proses simulasi adalah menyesuaikan model sistem hidrogen hijau pada Simulink dengan parameter masukan dan menjalankan simulasi sesuai dengan *time step* yang telah ditentukan yaitu satu bulan. Jumlah hari per bulan berbeda-beda sehingga input jumlah hari ditentukan jumlah hari pada bulan sesuai dengan data radiasi yang dimasukkan. Hal ini yang mempengaruhi perbedaan jumlah produksi hidrogen selain daripada jumlah radiasi matahari pada bulan tersebut. Fokus model simulasi merupakan model PLTS, sistem penyimpanan energi dan proses produksi hidrogen (elektroliser). Sementara itu model seperti pengisian baterai, pengaruh suhu terhadap produksi hidrogen dan listrik tidak dimodelkan. Berikut ini hasil simulasi untuk data radiasi pada bulan Oktober 2023.

Gambar 8 menunjukkan daya yang dihasilkan oleh PLTS dan daya yang digunakan oleh elektroliser. Terlihat adanya pola siklus yang berulang dengan puncak daya mencapai sekitar 2000 kW. Elektroliser menggunakan daya sesuai dengan pola yang mirip dengan daya yang dihasilkan oleh PV, menunjukkan bahwa operasinya sangat bergantung pada daya PV. Semakin tinggi radiasi matahari yang tersedia semakin optimal proses pembangkit listrik tenaga surya bekerja dan semakin baik proses produksi hidrogen di elektroliser.



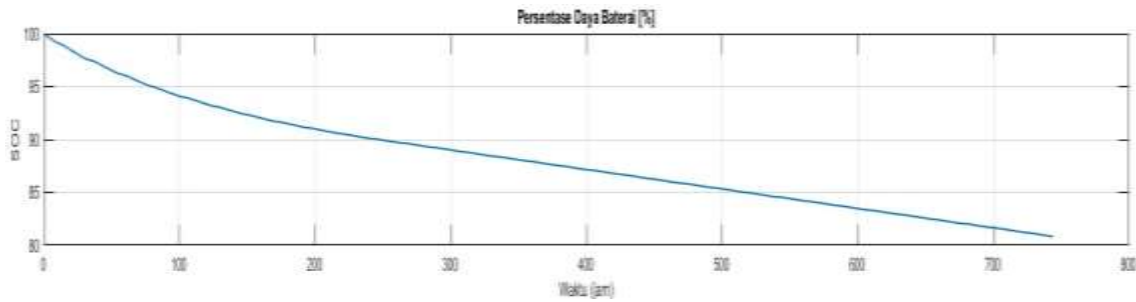
Gambar 8. Hubungan daya PV dengan elektroliser

Proses awal untuk menjalankan sistem pembangkit listrik tenaga surya membutuhkan *back up power* dari baterai cukup tinggi. Sementara itu produksi listrik dari solar panel tidak stabil maka dibutuhkan penyuplai listrik penyetabil yaitu baterai. Baterai juga akan menkompensasi kekurangan listrik dari sistem. Adapun saat pembangkit listrik tenaga surya tidak bekerja pada saat malam hari atau mendung serta hujan maka baterai berfungsi sebagai penyedia listrik hanya untuk *standby* sistem elektrolisis karena daya yang disuplai tidak bisa menghasilkan hidrogen. Gambar 9 memperlihatkan daya baterai yang mengalami discharge. Awalnya, daya discharge meningkat tajam dan kemudian menunjukkan pola osilasi yang stabil. Hal ini menunjukkan bahwa baterai memberikan daya tambahan untuk mengimbangi fluktuasi daya dari PLTS dan menjaga operasi elektroliser tetap stabil.



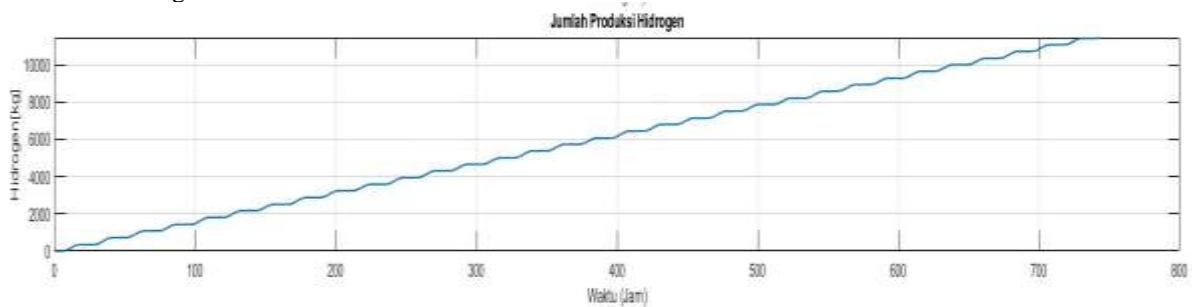
Gambar 9. Baterai discharge

Pengaturan atau *set up* baterai untuk *state of charge* (SOC) pada persentase *charging* baterai 80%. Alasan utama adalah untuk mengatur penggunaan baterai pada persentase 80% adalah sebagai upaya melindungi dan mengurangi degradasi kesehatan baterai. Oleh karena itu, sistem ini dirancang dengan menggunakan *battery management system* supaya titik maksimal *depth of discharge* di 80%. Dengan model seperti ini, harapannya umur baterai bisa 5 tahun atau lebih. Bentuk grafik fungsi persentase daya baterai (%) terhadap waktu (jam) pada Gambar 10.



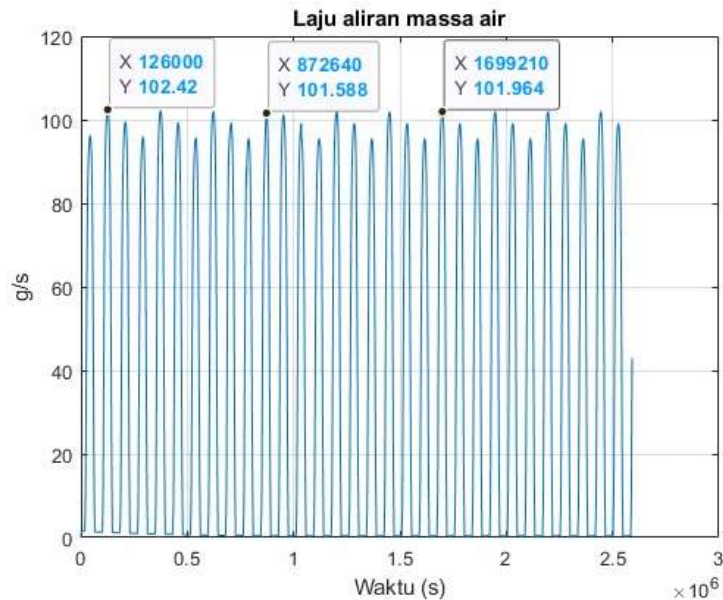
**Gambar 10.** Persentase daya baterai selama operasi

Gambar 11 menjelaskan tentang jumlah hidrogen yang diproduksi dalam satuan kg selama periode waktu (jam). Produksi hidrogen meningkat secara linier, yang menunjukkan bahwa elektroliser beroperasi dengan efisiensi dan konsistensi yang baik dalam jangka panjang. Jumlah produksi hidrogen pada bulan oktober 2023 sebesar 11.455 kg.



**Gambar 11.** Jumlah produksi hidrogen bulan Oktober 2023

Gambar 12 menjelaskan tentang laju aliran massa air dalam gram per detik (g/s) selama periode waktu (jam). Pola osilasi dengan puncak sekitar 102,4 g/s mirip dengan pola aliran hidrogen, mencerminkan hubungan langsung antara aliran air dan produksi hidrogen dalam proses elektrolisis. Puncak laju aliran air yang konsisten menunjukkan bahwa suplai air ke elektroliser diatur dengan baik dan stabil, yang penting untuk menjaga efisiensi proses elektrolisis. Stabilitas dalam laju aliran air sejalan dengan stabilitas laju aliran hidrogen, menunjukkan bahwa kontrol dan manajemen aliran air merupakan faktor kunci dalam menjaga kinerja optimal dari sistem elektroliser.

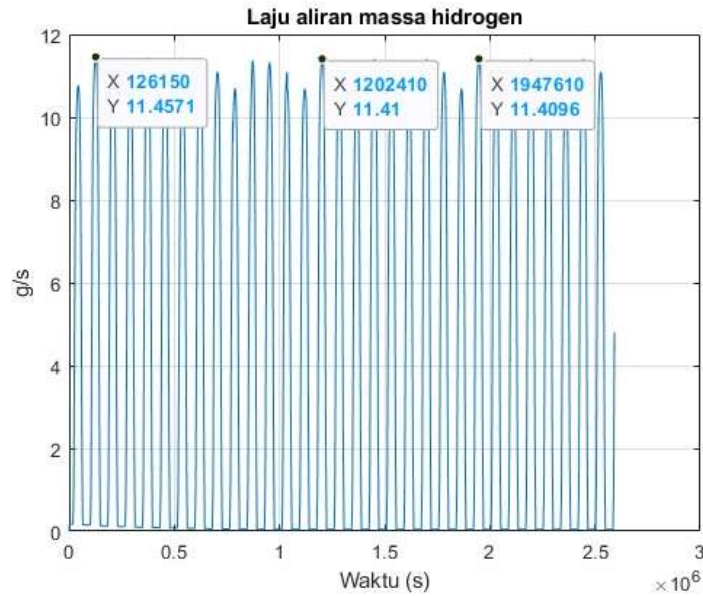


**Gambar 12.** Kebutuhan air untuk elektroliser

Gambar 13 menunjukkan laju aliran massa hidrogen dalam gram per detik (g/s) selama periode waktu. Laju aliran ini memiliki pola osilasi dengan puncak sekitar 11,46 g/s. Pola ini menunjukkan bahwa produksi hidrogen mengikuti siklus yang stabil dan berulang. Meskipun ada fluktuasi, puncak laju aliran tetap cukup konsisten sepanjang waktu, menunjukkan bahwa produksi hidrogen tetap stabil meskipun ada variasi kecil dalam



aliran massa. Stabilitas dalam laju aliran massa hidrogen menunjukkan bahwa elektroliser mampu mempertahankan operasi yang stabil dan efisien, menghasilkan hidrogen secara konsisten meskipun ada variasi kecil dalam input daya atau kondisi operasi lainnya. Menurut Carmo et al., (2013) produksi hidrogen per kg membutuhkan air 9 kali dari jumlah hidrogen. Pendapat Carmo et al. (2013) tersebut sesuai dengan hasil simulasi yaitu perbandingan antara laju aliran massa air 9 kali lebih banyak daripada laju aliran massa hidrogen ( $\frac{102,4}{11,46} = 9$ ) [25].



**Gambar 13.** Laju produksi hidrogen di elektroliser

Tabel 3 menunjukkan hasil simulasi kebutuhan air dan produksi hidrogen selama periode 12 bulan pada tahun 2023. Tabel ini mencakup kolom untuk bulan dan tahun, jumlah air yang dibutuhkan dalam kilogram (kg), jumlah hidrogen yang dihasilkan dalam kilogram (kg), dan durasi waktu simulasi dalam hari. Tabel ini memberikan gambaran rinci tentang kebutuhan air dan produksi hidrogen setiap bulannya.

**Tabel 3.** Hasil simulasi selama 12 bulan

Bulan, Tahun	Air (kg)	H <sub>2</sub> (kg)	Waktu Simulasi
Jan-23	90.108	10.012	31 hari
Feb-23	77.400	8.600	28 hari
Mar-23	91.494	10.166	31 hari
Apr-23	84.816	9.424	30 hari
May-23	89.838	9.982	31 hari
Jun-23	85.095	9.455	30 hari
Jul-23	85.050	9.450	31 hari
Aug-23	96.381	10.709	31 hari
Sep-23	96.498	10.722	30 hari
Oct-23	103.095	11.455	31 hari
Nov-23	92.943	10.327	30 hari
Dec-23	99.801	11.089	31 hari
<b>Total</b>		121.391	365 hari

Dari tabel, terlihat bahwa kebutuhan air bervariasi setiap bulan, dengan jumlah tertinggi pada bulan Oktober sebesar 103.095 kg dan jumlah terendah pada bulan Februari sebesar 77.400 kg. Produksi hidrogen juga menunjukkan variasi bulanan, dengan nilai tertinggi tercatat pada bulan Oktober sebesar 11.722 kg dan nilai terendah pada bulan Februari sebesar 8.600 kg. Durasi simulasi setiap bulan sebagian besar adalah 31 hari, dengan beberapa pengecualian pada bulan Februari (28 hari), April (30 hari), Juni (30 hari), dan September (30 hari).

Secara keseluruhan, total kebutuhan air selama periode 12 bulan proses produksi sistem hidrogen hijau adalah 991.024 kg air dan total produksi hidrogen adalah sebanyak 121.391 kg hidrogen. Tabel ini menunjukkan data penting untuk analisis kebutuhan air dan produksi hidrogen, yang dapat digunakan untuk perencanaan dan pengoptimalan proses produksi di masa mendatang. Fluktuasi dalam jumlah produksi bisa disebabkan oleh berbagai faktor termasuk kondisi operasional, efisiensi proses, dan juga faktor eksternal seperti kondisi cuaca.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini mengembangkan model sistem hidrogen hijau yang terintegrasi dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) jaringan mikro di Lombok menggunakan simulasi MATLAB Simulink. Dengan kapasitas PLTS sebesar 2,33 MWp dan elektroliser *Proton Exchange Membrane* (PEM) dengan daya 2 MW, hasil simulasi menunjukkan produksi hidrogen sebanyak 121.391 kg per tahun. Simulasi menggunakan data radiasi matahari tahun 2023 sebagai acuan, dan hasilnya menunjukkan bahwa produksi hidrogen cukup banyak dengan menggunakan sumber listrik dari PLTS, berpotensi untuk dekarbonisasi sektor-sektor energi di Lombok. Desain sistem ini mencakup konversi energi surya menjadi listrik melalui PLTS, yang kemudian digunakan untuk menjalankan proses elektrolisis air pada elektroliser PEM. Hidrogen yang dihasilkan kemudian disimpan dalam tangki penyimpanan hidrogen setelah dikompresi. Penelitian ini menunjukkan potensi besar PLTS di Kawasan sirkuit Mandalika Lombok untuk mendukung produksi energi hijau, sejalan dengan upaya global dalam mitigasi perubahan iklim melalui dekarbonisasi energi. Selain itu, penggunaan sistem penyimpanan energi memungkinkan stabilitas produksi, meskipun ada fluktuasi pasokan daya dari PLTS.

#### Daftar Pustaka

- [1] E. S. Hanley, J. Deane, and B. Ó. Gallachóir, "The role of hydrogen in low carbon energy futures—A review of existing perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3027–3045, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.034.
- [2] S. Baral and J. Šebo, "Techno-economic assessment of green hydrogen production integrated with hybrid and organic Rankine cycle (ORC) systems," *Heliyon*, vol. 10, no. 4, p. e25742, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25742.
- [3] M. Rodriguez, D. Arcos-Aviles, and W. Martinez, "Fuzzy logic-based energy management for isolated microgrid using meta-heuristic optimization algorithms," *Appl Energy*, vol. 335, p. 120771, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.APENERGY.2023.120771.
- [4] IEA, *The Future of Hydrogen*. OECD, 2019. doi: 10.1787/1e0514c4-en.
- [5] R. Hancke, T. Holm, and Ø. Ulleberg, "The case for high-pressure PEM water electrolysis," *Energy Convers Manag*, vol. 261, p. 115642, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115642.
- [6] E. B. Agyekum, C. Nutakor, A. M. Agwa, and S. Kamel, "A Critical Review of Renewable Hydrogen Production Methods: Factors Affecting Their Scale-Up and Its Role in Future Energy Generation," *Membranes 2022, Vol. 12, Page 173*, vol. 12, no. 2, p. 173, Feb. 2022, doi: 10.3390/MEMBRANES12020173.
- [7] M. Awad *et al.*, "A review of water electrolysis for green hydrogen generation considering PV/wind/hybrid/hydropower/geothermal/tidal and wave/biogas systems, economic analysis, and its application," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 87, pp. 213–239, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.aej.2023.12.032.
- [8] S. Fakourian and M. Alizadeh, "Hydrogen Generation from the Wastewater of Power Plants via an Integrated Photovoltaic and Electrolyzer System: A Pilot-Scale Study," *Energy & Fuels*, vol. 37, no. 8, pp. 6099–6109, Apr. 2023, doi: 10.1021/acs.energyfuels.3c00186.
- [9] R. R. Urs, M. Sadiq, A. Mayyas, and A. Al Sumaiti, "Technoeconomic Assessment of Various Configurations Photovoltaic Systems for Energy and Hydrogen Production," *Int J Energy Res*, vol. 2023, pp. 1–13, Feb. 2023, doi: 10.1155/2023/1612600.
- [10] L. M. Ringsgwandl, J. Schaffert, N. Brücken, R. Albus, and K. Görner, "Current Legislative Framework for Green Hydrogen Production by Electrolysis Plants in Germany," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 5, p. 1786, Feb. 2022, doi: 10.3390/en15051786.
- [11] D. Pivetta, C. Dall'Armi, and R. Taccani, "Multi-Objective Optimization of a Hydrogen Hub for the Decarbonization of a Port Industrial Area," *J Mar Sci Eng*, vol. 10, no. 2, p. 231, Feb. 2022, doi: 10.3390/jmse10020231.
- [12] J. Settino, R. N. Farrugia, D. Buhagiar, and T. Sant, "Offshore Wind-to-Hydrogen Production Plant Integrated with an Innovative Hydro-Pneumatic Energy Storage Device," *J Phys Conf Ser*, vol. 2151, no. 1, p. 012013, Jan. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2151/1/012013.
- [13] R. Ahshan, "Potential and Economic Analysis of Solar-to-Hydrogen Production in the Sultanate of Oman," *Sustainability*, vol. 13, no. 17, p. 9516, Aug. 2021, doi: 10.3390/su13179516.

- [14] T. Kerdphol, F. Rahman, Y. Mitani, K. Hongesombut, and S. Küfeoğlu, “Virtual Inertia Control-Based Model Predictive Control for Microgrid Frequency Stabilization Considering High Renewable Energy Integration,” *Sustainability*, vol. 9, no. 5, p. 773, May 2017, doi: 10.3390/su9050773.
- [15] A. Mahdavian, A. A. Ghadimi, and M. Bayat, “Microgrid small-signal stability analysis considering dynamic load model,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 13, pp. 2799–2813, Oct. 2021, doi: 10.1049/rpg2.12203.
- [16] A. J. Albarakati *et al.*, “Real-Time Energy Management for DC Microgrids Using Artificial Intelligence,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 17, p. 5307, Aug. 2021, doi: 10.3390/en14175307.
- [17] Y. S. Foo Eddy, H. B. Gooi, and S. X. Chen, “Multi-Agent System for Distributed Management of Microgrids,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 24–34, Jan. 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2322622.
- [18] R. Jabeur, Y. Boujoudar, M. Azeroual, A. Aljarbouh, and N. Ouaaline, “Microgrid energy management system for smart home using multi-agent system,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 12, no. 2, p. 1153, Apr. 2022, doi: 10.11591/ijece.v12i2.pp1153-1160.
- [19] BMKG, “Prakiraan Cuaca,” BMKG NTB. Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.bmkg.go.id/cuaca/prakiraan-cuaca.bmkg?Kota=Praya&AreaID=501422&Prov=22>
- [20] SolCastApi, “Solar Radiation,” SolCast DNV Company. Accessed: Apr. 26, 2024. [Online]. Available: <https://toolkit.solcast.com.au/#/weather-sites/c950-6754-6308-12e9/detail>
- [21] M. NASSER, T. MEGAHED, S. OOKAWARA, and H. HASSAN, “Techno-economic assessment of green hydrogen production using different configurations of wind turbines and PV panels,” *Journal of Energy Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 560–572, Dec. 2022, doi: 10.30521/jes.1132111.
- [22] Mohamed Khaled Khalaf *et al.*, “Sustainability and Renewable Energy Challenge Techno-Economic Assessment of Green Hydrogen Production Project Number (236),” Cairo, 2019. Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://github.com/Ainshamsuniverity/Techno-Economic-Assessment-of-Green-Hydrogen-Production-Project-Solution>
- [23] K. Franzén, “Evaluating electrolyser setups for hydrogen production from offshore wind power: A case study in the Baltic Sea,” 2023. Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/196190>
- [24] Inc. The MathWorks, “MATLAB version: 9.13.0 (R2023b),” 2024, *The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts*. Accessed: Apr. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com>
- [25] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, and D. Stolten, “A comprehensive review on PEM water electrolysis,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 12, pp. 4901–4934, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.151.