

Pengaruh Daya Aktivasi UV-A dan UV-C Terhadap Efisiensi Produksi Hidrogen pada Sistem MW-PEC (*Multi-Wavelength Photoelectrochemical*)

Jani F Mandala^{1*}, Matheus M. Dwinanto², Welem F. Galla³, Muhamad Jafri⁴, Verdy Koelhuan⁵

^{1,3} Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknik Universitas Nusa Cendana

^{2,4,5} Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik Universitas Nusa Cendana

Jl. Adisucipto, Penfui-Kupang, NTT 85001, Tlp. (0380)881597

*Corresponding author: yani.mandala@staf.undana.ac.id

ABSTRAK

Merujuk pada *International Energy Agency* dan target COP21 mengenai pengurangan emisi karbon serta menipisnya cadangan bahan bakar fosil, maka hidrogen menjadi salah satu alternatif energi dengan densitas energi yang tinggi. Salah satu metode produksi hydrogen, dapat dilakukan melalui fotolisis air tetapi terkendala oleh tingginya rekombinasi pasangan elektron (e^-) dan hole (h^+). Untuk itu dilakukan kajian penelitian yang dapat menguji solusi permasalahan tersebut menggunakan sistem *Multi-Wavelength Photoelectrochemical* (MW-PEC) yang mengintegrasikan proses fotokatalitik dan elektrokimia. Penelitian ini membandingkan produksi hidrogen melalui elektrolisis, fotolisis, dan MW-PEC yang menggabungkan kedua metode tersebut.

Sistem ini bekerja pada reaktor silinder berisi 715 mL dengan larutan KOH dan pada plate anoda dilapisi komposit TiO_2 -grafit sebagai konduktif yang optimal. Sedangkan *buck converter* pada proses ini untuk pengendali daya pada LED UV-A dan plat elektroda serta *blower* untuk menjaga homogenitas larutan. Sedangkan pada UV-C dayanya konstan dengan fungsi untuk konduksikan TiO_2 .

Hasil uji selama 30 menit, bahwa elektrolisis menghasilkan gas HHO sebesar 1,9 mL pada 2,7 Vdc dan 3,3 mL pada 5 Vdc. Untuk fotolisis dengan 2,7 Vdc dan 3.5Vdc menghasilkan 1,5 mL dan 1,8 mL. Sedangkan MW-PEC menghasilkan 0,7 mL pada 2,7 V dan 1,3 mL pada 5 V.

Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi MW-PEC, mampu mengintegrasikan proses elektrokimia dan fotokatalitik, namun belum meningkatkan produksi hidrogen dibandingkan elektrolisis murni. Kinerja tersebut diduga dipengaruhi oleh rekombinasi elektron-hole, distribusi intensitas UV, komposisi ketebalan lapisan komposit TiO_2 -grafit, sehingga diperlukan optimasi lebih lanjut terhadap material dan desain reaktor.

ABSTRACT

Referring to the International Energy Agency and the COP21 target on reducing carbon emissions, as well as the depletion of fossil fuel reserves, hydrogen has become an alternative energy carrier with high energy density. One method of hydrogen production is water photolysis, but it is hindered by the high recombination of electron (e^-) and hole (h^+) pairs. This study therefore tests a solution to this problem using a Multi-Wavelength Photoelectrochemical (MW-PEC) system that integrates photocatalytic and electrochemical processes. The study compares hydrogen production through electrolysis, photolysis, and MW-PEC, which combines both methods.

The system operates in a cylindrical reactor containing 715 mL of KOH solution, and the anode plate is coated with a TiO_2 -graphite composite as an optimal conductive layer. A buck converter controls the power of the UV-A LEDs and the electrode plates, and a blower keeps the solution homogeneous, whereas the UV-C lamp runs at constant power to activate the TiO_2 .

In a 30-minute test, electrolysis produced 1.9 mL of HHO gas at 2.7 Vdc and 3.3 mL at 5 Vdc. Photolysis at 2.7 Vdc and 3.5 Vdc produced 1.5 mL and 1.8 mL, respectively, while MW-PEC produced 0.7 mL at 2.7 V and 1.3 mL at 5 V.

These results show that the MW-PEC configuration is able to integrate electrochemical and

photocatalytic processes, but has not yet increased hydrogen production compared with pure electrolysis. This performance is presumed to be influenced by electron-hole recombination, the distribution of UV intensity, and the composition and thickness of the TiO₂-graphite composite layer, so further optimization of the material and reactor design is required.

Keywords: *Hydrogen; Electrolysis and Photolysis; MW-PEC; Buck Converter; TiO₂-Graphite Slurry*

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi global terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan aktivitas industri, sementara ketergantungan terhadap bahan bakar fosil menimbulkan permasalahan serius terhadap keberlanjutan lingkungan. Laporan dari *International Energy Agency* (IEA) [1] menunjukkan tren peningkatan konsumsi energi dunia yang signifikan, sedangkan komitmen global melalui COP21 [2] menekankan urgensi pengurangan emisi gas rumah kaca akibat penggunaan energi fosil. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi bersih menjadi prioritas utama dan salah satunya melalui pemanfaatan hidrogen sebagai energi alternatif yang ramah lingkungan [4].

Produksi hidrogen berbasis Photoelectrochemical water splitting (PEC) menjadi pendekatan yang menjanjikan karena mampu mengkonversi energi cahaya menjadi energi kimia secara langsung. Material semikonduktor seperti TiO₂ banyak digunakan sebagai fotokatalis karena stabilitas kimia dan biaya yang relatif rendah, meskipun demikian TiO₂ memiliki keterbatasan pada efisiensi akibat rekombinasi pasangan elektron-hole serta keterbatasan penyerapan spektrum cahaya [5;7]. Penelitian-penelitian ini, sebagian besar berfokus pada rekayasa material, sementara pendekatan berbasis rekayasa spektrum (spectral engineering) melalui pemanfaatan multi-panjang gelombang cahaya masih relatif terbatas. Untuk itu dilakukan pendekatan kombinasi radiasi UV-A (365 nm) dan UV-C (254 nm) yang berpotensi meningkatkan eksitasi elektron secara simultan, di mana UV-C berperan sebagai sumber energi tinggi untuk menghasilkan pasangan elektron-hole, sedangkan UV-A berkontribusi dalam menjaga kestabilan eksitasi serta memanfaatkan defect states pada material. Pendekatan ini berbeda dengan sistem konvensional yang umumnya hanya menggunakan satu sumber cahaya dengan spektrum terbatas yang telah dilakukan untuk meningkatkan kinerja PEC, termasuk modifikasi material dan rekayasa struktur untuk memperluas spektrum serapan cahaya [8].

Dengan demikian, maka perlu penekanan pada integrasi langsung Photoelectrochemical (MW-PEC) dalam sistem berbasis spektrum elektrokimia untuk meningkatkan efisiensi produksi hidrogen melalui peningkatan jumlah pembawa muatan, serta kontrol spektrum yang lebih fleksibel. Pendekatan ini, dapat memberikan kontribusi baru dalam pengembangan sistem PEC yang lebih efisien, terkontrol, dan aplikatif untuk teknologi energi berkelanjutan.

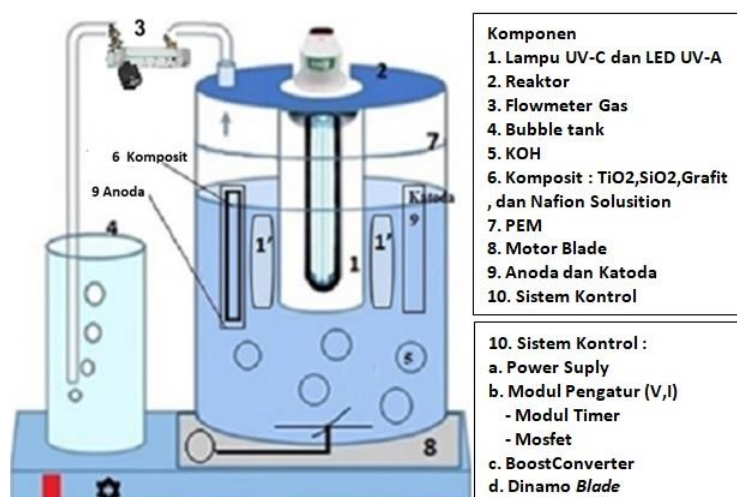
2. METODOLOGI

Penelitian *Multi-Wavelength Photoelectrochemical* (MW-PEC) ini menerapkan pendekatan dan pengembangan (*Research and Development*) dengan metode eksperimental untuk mengevaluasi performa sistem produksi hidrogen berbasis energi terbarukan. Sistem ini dikembangkan melalui integrasi proses fotolisis air menggunakan material komposit di bawah iradiasi ultraviolet (UV-C: 254 nm, 10 W dan UV-A: 365 nm, 3 W) dengan proses elektrolisis guna meningkatkan efisiensi konversi energi [4;5]. Material aktif berupa TiO₂ dimodifikasi dengan grafit untuk memperluas area permukaan spesifik, meningkatkan stabilitas, serta mengoptimalkan konduktivitas elektron [3;7]. Sedangkan pada bagian kompartemen reaktor menggunakan elektrolit KOH pada aquades 715 mliter untuk meningkatkan konduktivitas ionik dan mempercepat transpor muatan. Konfigurasi sistem ini dengan dua elektrode (anode-katode) dioperasikan pada tegangan nominal $\pm 2,7$ Vdc hingga 5 Vdc dengan arus

berkisar 2,5 A - 5 A. sedangkan untuk UV-A di bawah paparan radiasi UV. diberlakukan tegangan 3 Vdc 3,5 Vdc dengan arus < 3 ampere.

Untuk plate elektroda dengan metode MW-PEC, pada bagian anode dideposisi material komposit dengan menggunakan teknik *binder-assisted coating* dengan larutan Nafion 5% yang berfungsi sebagai agen pengikat (*binder*) untuk menyatukan partikel TiO₂ dan grafit. Metode ini menghasilkan lapisan homogen dengan adhesi substrat yang kuat tanpa menghambat jalur transpor proton [8].

Selain itu, sistem ini diintegrasikan dengan sistem manajemen daya berbasis *DC buckt converter* untuk menjaga stabilitas suplai tegangan. Integrasi komprehensif ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi konversi energi sekaligus menjaga stabilitas operasional sistem secara keseluruhan [9].



Gambar 1 Reaktor : Fotolisis dan Elektrolisis

2.1 Cara Kerja Sistem

a. Reaktor

Pada bagian bawah reaktor (Gambar 1) dipasang pengaduk mekanis *blade* (*blower*) berkecepatan 5–10 rpm atau lebih untuk menjaga homogenitas larutan, mencegah sedimentasi atau aglomerasi partikel, serta meningkatkan distribusi reaktan secara merata.

Selama pengujian fotolisis dan elektrolisis, sistem disuplai dengan daya yang variasi dan diatur oleh *DC buck converter*, khususnya untuk mengoptimalkan intensitas radiasi UV-A yang mengaktivasi material fotokatalis TiO₂. Aktivasi ini memicu eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi, menghasilkan pasangan elektron–lubang (e^-/h^+). Elektron kemudian ditransfer menuju katode melalui media grafit, sedangkan lubang (*hole*) mengoksidasi ion OH⁻. Di sisi katode, elektron mereduksi air untuk menghasilkan gas hidrogen.

Gas hidrogen yang keluar dari reaktor dialirkan menuju tangki penggelembung (*bubble tank*) yang berfungsi ganda sebagai media pemurnian dan sistem pengaman. Di dalam *bubble tank*, gas dilewatkan ke dalam media cair untuk menyaring uap air serta sisa elektrolit yang terbawa oleh aliran gas, sehingga meningkatkan kemurnian gas hidrogen yang dihasilkan. Selain itu, *bubble tank* juga berperan sebagai sistem pengaman pasif (*gas trap*) untuk mencegah aliran balik (*backflow*) serta mengeliminasi risiko kilas balik api (*flashback*) ke dalam reaktor.

b. Binder Komposit

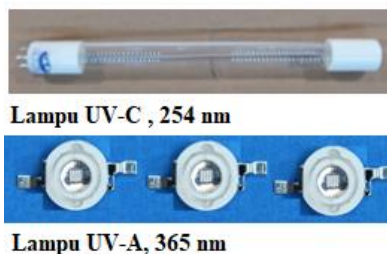
Proses pembuatan suspensi (*slurry*) komposit untuk dideposisikan pada pelat anode dalam sistem MW-PEC diawali dengan pencampuran TiO_2 (8,5 mg) dan grafit (0,5 mg) dengan rasio massa nominal yang berfungsi sebagai material aktif yang akan dilapiskan pada pelat anode berdimensi 3 cm $\times$ 15 cm



Gambar 2. *Slurry* yang direkatkan pada Plat Anoda

Campuran tersebut didispersikan ke dalam pelarut, kemudian ditambahkan 1,5 mL larutan Nafion 5% hingga terbentuk tinta katalis (*catalyst ink*) yang homogen. Tinta katalis ini selanjutnya dideposisikan pada substrat konduktif menggunakan metode *doctor blade* (bilah perata), lalu dikeringkan pada suhu rendah untuk menguapkan fase pelarut. Tahap berikutnya adalah perlakuan pemanasan (*annealing*) ringan pada suhu $<100^\circ\text{C}$ guna memperkuat daya lekat (adhesi) antar partikel tanpa merusak struktur polimer Nafion. Untuk meningkatkan stabilitas mekanis dan lapisan kimia, permukaan film komposit diperkuat kembali melalui pelapisan pelindung (*overcoating*) menggunakan larutan Nafion 5%. Prosedur ini menghasilkan film komposit dengan adhesi yang kuat pada anode, serta memiliki karakteristik yang stabil, konduktif, dan optimal dalam mendukung reaksi oksidasi air [10;11].

c. Rangkaian Pengatur Daya



Gambar 3. Lampu UV-C dan Led UV-A

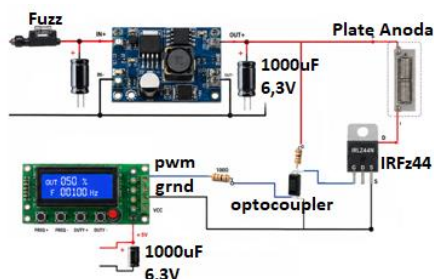
Rangkaian sistem MW-PEC (Gbr 5) disuplai oleh sumber daya utama dari jaringan jala-jala PLN yang jalurnya dibagi menjadi dua bagian utama:

1. **Jalur Pertama:** Menyuplai daya untuk lampu UV-C (Gbr 3) melalui rangkaian *ballast* bawaan yang dihubungkan ke terminal lampu UV-C 10 watt tipe empat pin.
2. **Jalur Kedua:** Menghubungkan sumber PLN (AC 220 V, 2 A) ke transformator penurun tegangan (*step-down transformer*) untuk menghasilkan tegangan 12 V dengan arus rerata 10A. Tegangan tersebut kemudian disearahkan dan dinaikkan serta distabilkan [21] menggunakan modul *DC-to-DC buck converter* menjadi DC $\pm 1,5$ Vdc – 7 Vdc dan arus maksimal 5 ampere VDC sampai 5 ampere.

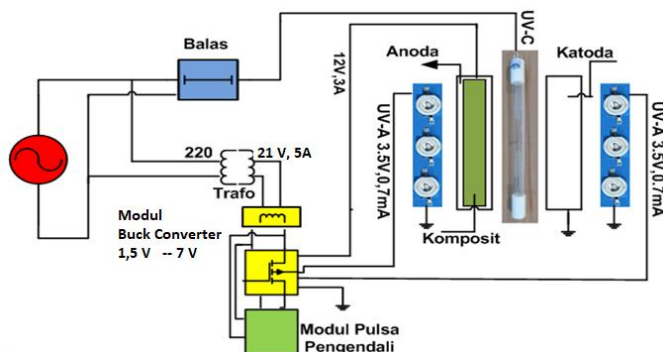
Keluaran daya ini disalurkan untuk menyuplai sistem elektrolisis (pada elektrode anode–katode berdimensi 15 x 3 cm) sebesar $\pm 2,5$ Vdc – 5 Vdc dan arus 3 ampere,

Sedangkan pada *LED UV-A* ini, dibuat 3 jalur secara paralel dan setiap jalur dibatasi dengan resistor (5 W) sebagai pembatas tegangan untuk menyuplai sumber listrik ke 5 *LED UV-A*. Penempatan nilai R ini, dilakukan secara serial dengan *LED UV-A* pada masing-masing jalur (dipararel).

Untuk elektrolisis(plate anoda) disuplay dengan besaran daya yang bervariasi, melalui pengaturan modul XY-LPWM terhadap Mosfet(Gbr-4 dan 5). Sumber tegangan 12V $\pm$ 10A dilanjutkan ke *buck converter* menjadi 1,5 – 7 Vdc dan $I < \pm 5A$. Tegangan keluaran kemudian disalurkan ke beban melalui MOSFET sebagai saklar elektronik. Modul XY-LPWM menghasilkan sinyal PWM untuk mengatur besar kecilnya daya yang diterima plate anoda. Semakin besar *duty cycle* PWM, semakin besar arus yang mengalir. Rangkaian menggunakan metode *low side switching* agar kontrol lebih sederhana dan efisien.



Gambar 4. Rangkaian Pengaturan Daya

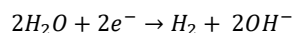


Gambar 5. Rangkaian Pengatur Daya MW-PEC

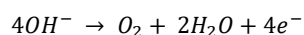
2.2 Proses Elektrolisis

Reaktor yang digunakan menggunakan larutan KOH yang berfungsi untuk meningkatkan konduktivitas ionik. Hal ini menyebabkan hambatan listrik larutan menjadi lebih kecil sehingga arus elektrolisis dapat meningkat. KOH merupakan salah satu elektrolit alkali paling efektif untuk proses elektrolisis air karena memiliki mobilitas ion yang tinggi serta stabilitas kimia yang baik [12].

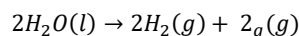
Pada elektrolisis larutan alkali KOH, reaksi yang terjadi pada katoda (reduksi) adalah :



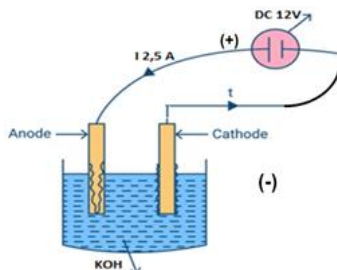
Reaksi di katoda ini menghasilkan gas hidrogen. Sementara itu, reaksi yang terjadi pada anoda (oksidasi) adalah :



Reaksi di anoda ini menghasilkan gas oksigen. Dengan demikian, reaksi total dari proses elektrolisis air ini adalah :



Persamaan reaksi total tersebut menunjukkan bahwa setiap 2 mol air (H_2O) yang bereaksi akan menghasilkan 2 mol gas hidrogen (H_2) dan 1 mol gas oksigen (O_2) [13]



Gambar 6. Proses Elektrolisis Berdasarkan Faraday

Spesifikasi sistem :

- Material elektroda = Stainless Steel 316
- Jumlah elektroda = 1 anoda dan 1 katoda
- Ukuran elektroda = $15\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ dan luas satu sisi elektroda = $\pm 45\text{ cm}^2$
- Jarak antar elektroda = $\pm 3\text{ cm}$
- Tegangan sumber = 12 Vdc
- Arus listrik = 5 Ampere
- Tegangan Out = min 1,7 Vdc - max 7 Vdc
- Arus Out = ± 3 Ampere
- Massa KOH = 30 gram
- Diameter tabung = 4,5 cm
- Tinggi tabung = 18 cm

Untuk volume air dan lauran yang akan di gunakan dalam reaktor dapat didekati dengan pendekatan $V = \pi r^2 h$ yang bersisi 715 mL air. Tetapi dalam pendekatan ini volume air (V) hanya digunakan sebesar 75% dari total volume reaktor maka volume air 715 mL air bersama dengan material pendukung proses pelepasan hidrogen.

Untuk kebutuhan daya listrik(pendekatan), diperoleh : $P = V \times I = 12 \times 2,5 = 30\text{ watt}$. Dan energi daya perjam diperoleh : $E = P \times t = 30 \times 3600 = 108000\text{ joule} \approx 108\text{ kJ}$. Dari perhitungan awal ini dan pendekatan hukum Faraday, maka jumlah zat yang terbentuk pada elektroda sebanding dengan banyaknya sumber listrik yang mengalir.

$$nN_2 = It/2F \quad (1)$$

Dimana :

I = arus listrik (A)

t = waktu (s)

F = konstanta Faraday = 96485 C/mol

2 = jumlah elektron pembentuk 1 mol H_2

Maka jumlah zat dari muatan nN_2 yang terventuk, menjadi ;

$$nN_2 = 2,5 \times 3600 / 2 \times 96485 = 0,0466\text{ mol}$$

Jadi untuk memperoleh hidrogen dengan pendekatan persamaan di atas dan didekati dengan kondisi standar untuk 1 mol dengan kisaran volume gas 22,4 liter yang mana rumusan perhitungan ini dari :

$$PV = nRT \quad (2)$$

Karena dicari V, maka

$$V = nRT/P \quad (3)$$

Dimana :

$$T=273K$$

$$P=1 \text{ atm}$$

$$R=0,082L.atm/mol.K$$

$$\text{Maka disubstitusikan, menjadi : } V = n(0,082)(273) / 1$$

$$V = n(22,4)$$

$$\text{Dengan demikian diperoleh , } V = n \times 22,4$$

Jadi bilamana nilai $n = 1 \text{ mol} \rightarrow$ maka volume = 22,4 liter dan bilamana $n = 0,5 \text{ mol} \rightarrow$ maka volume = 11,2 liter.

Sehingga dalam penerapan pada Gas Hidrogen Elektrolisis, diperoleh :

$$n(H_2) = 0,0466 \text{ mol}$$

Karena setiap 1 mol gas menempati 22,4 liter, maka:

$$V(H_2) = n \times 22,4$$

$$\text{Substitusi } V(H_2) = 0,0466 \text{ mol} \times 22,4$$

$$V(H_2) = 1,04384$$

$$\text{Jika dibulatkan dalam 1 jam produksi gas hidrogen menjadi } V(H_2) \approx 1,04 \text{ liter/jam}$$

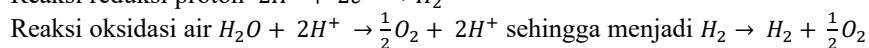
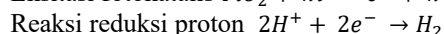
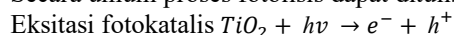
Berdasarkan analisa diatas maka, peningkatan arus listrik menyebabkan peningkatan jumlah elektron yang mengalir menuju elektroda. Elektron tersebut mereduksi molekul air pada katoda menjadi gas hidrogen. Semakin besar arus, semakin banyak elektron yang tersedia untuk memecah molekul air sehingga laju produksi gas meningkat. Fenomena ini sesuai dengan teori kinetika elektrokimia dan Hukum Faraday yang menyatakan hubungan linear antara arus listrik dan jumlah produk elektrolisis [14].

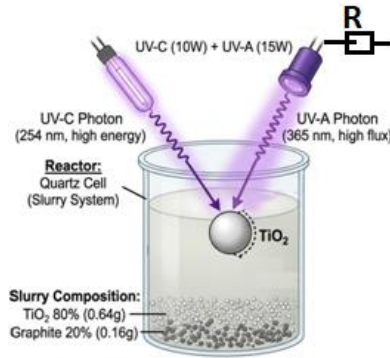
Dipihak lain penggunaan *Stainless Steel* 316 memberikan keuntungan karena material ini memiliki ketahanan korosi yang baik terhadap lingkungan basa KOH serta stabil pada proses evolusi hidrogen dan oksigen. Penelitian ini menunjukkan bahwa material tersebut cukup efektif dan ekonomis untuk produksi hidrogen skala kecil hingga menengah [13]

Berdasarkan pendekatan ini, maka secara teori sistem elektrolisis dengan tegangan 3 volt dan arus 5 ampere menggunakan elektroda *stainless steel* 316 berukuran $15 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ memerlukan daya sebesar 2,4 sampai 15 watt dan mampu menghasilkan gas sekitar 1,04 liter gas hidrogen pada kondisi ideal selama 1 jam.

2.3 Proses Fotolisis

Secara umum proses fotolisis dapat ditulis(Fujishima dan Honda) dengan rumus untuk ;





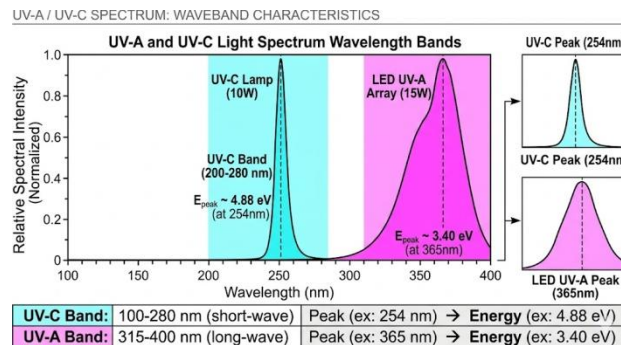
Gambar 7. Proses Fotolisis Planck–Einstein

Pada sistem fotokatalitik diperlukan ruang akumulasi gas hidrogen sebagaimana yang dikemukakan di atas, sehingga volume kerja air 715 mL air dan proses TiO_2 serta grafit dicampur langsung di dalam air membentuk *slurry* (suspensi). Dalam sistem *slurry* fotokatalitik, konsentrasi katalis berada pada rentang 1–5 g/L untuk menjaga penetrasi cahaya dan homogenitas suspensi. Pada volume air 715 mL digunakan total katalis sebesar $\pm 0,8$ gram dengan komposisi $\text{TiO}_2 \pm 90 - 95\%$ dan grafit 2 - 5%. Maka massa masing-masing material adalah :

$$m\text{TiO}_2 = 0.90 \times 0.8 = \pm 0.74 \text{ g} = \text{real } 0,8 \text{ gram}$$

$$m\text{Grafit} = 0.5 \times 0.8 = \pm 0.4 \text{ g} = \text{real } 0,2 \text{ gram}$$

komposit dua larutan ini sebagai *slurry* untuk mempercepat transfer elektron dan mengurangi rekombinasi elektron–hole dengan pendekatan spektrum cahaya melalui analisis energi foton berdasarkan hubungan Planck–Einstein (Gbr-7), $E = hc/\lambda$ [18]. Persamaan ini menyatakan bahwa energi foton berbanding terbalik dengan panjang gelombang cahaya.



Gambar 8. Spektrum Tampak UV-C dan UV-A

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (4)$$

Dimana :

E = Energi foton

h = Konstanta Planck

c = Kecepatan Cahaya

Energi foton UV

Panjang gelombang (λ) UV-C = 254 nm = 254×10^{-9} m

Sehingga :

$$E = (6,626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8) / (254 \times 10^{-9})$$

$$E = 7,83 \times 10^{-19} \text{ J/foton} \approx 4,89 \text{ eV}$$

Panjang gelombang (λ) UV-A = 365 nm

$$E = (6,626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8) / (365 \times 10^{-9})$$

$$E = 5,45 \times 10^{-19} \text{ J/foton} \approx 3,40 \text{ eV}$$

Jumlah foton yang dipancarkan dihitung menggunakan persamaan

$$P = N \times E \quad (5)$$

Tetapi ditekan pada jumlah butiran cahaya (N) atau flux foton, maka penentuan N :

$$N = P/E \quad (6)$$

Dimana :

P = Daya

E = Energi foton

N = Jumlah butiran cahaya(flux foton)

Apabila daya lampu UV sebesar 22 W, maka:

$$N = 22 / (5,45 \times 10^{-19})$$

$$N = 4,03 \times 10^{19} \text{ foton/detik}$$

Artinya, setiap detik lampu memancarkan sekitar $4,03 \times 10^{19}$ foton yang dapat berinteraksi dengan permukaan TiO_2 .

Berdasarkan penelitian sebelumnya [19], kombinasi UV-A dan UV-C mampu meningkatkan aktivitas fotokatalis TiO_2 dimana UV-C menyediakan energi foton yang tinggi untuk mengeksitasi elektron, sedangkan UV-A meningkatkan jumlah foton yang mengenai permukaan katalis. Sedangkan pada pemberian grafit membantu mempercepat perpindahan elektron sehingga mengurangi rekombinasi pasangan elektron-hole.

Apabila efisiensi fotokonversi sistem diasumsikan 5%, maka daya yang efektif digunakan untuk reaksi adalah:

$$P_{\text{ef}} = \eta \times P$$

dengan $\eta = 0,05$

$$P_{\text{ef}} = 0,05 \times 22 = 1,1 \text{ W}$$

Untuk muatan energi selama satu jam, dapat dihitung dengan :

$$Q = P \times t \quad (7)$$

$$Q = 1,1 \times 3600$$

$$Q = 3960 \text{ J}$$

Sedangkan total energi Gibbs pemisahan air dengan konstanta sebesar : $\Delta G = 237000 \text{ J/mol}$, maka jumlah mol secara teoritis :

$$n(\text{H}_2) = \frac{Q}{\Delta G} \quad (8)$$

$$n(\text{H}_2) = 3960 / 237000 = 0.016 \text{ mol}$$

$$PV = nRT \quad (9)$$

Karena di cari Volume, maka

$$V = nRT/P \quad (10)$$

Dimana

P = Pressure / Tekanan gas = 1atm

V = volume gas standar

n = jumlah mol gas =1

$R = \text{konstanta gas ideal} = 0,08206 \text{ L} \cdot \text{atm} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$T = \text{Tempartur} = 273.15 \text{ K}$

$V = nRT / P = (1) 0,08206 \times 273.15 / 1$
 $= 22.4 \text{ L}$

Artinya 1 mol gas ideal pada STP(*standard Temperature and Pressure* atau Suhu dan Tekanan Standar) menempati volume 22,4 liter, jadi pada kondisi standar, volume hidrogen yang dihasilkan.

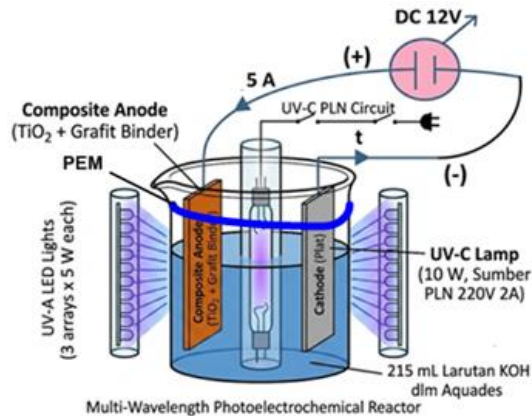
$V = n(\text{H}_2) \times V$

$V = 0.016 \times 22.4 = 0.374 \text{ L/jam.}$

Hal ini sesuai dengan jumlah foton diperoleh(Michael) dengan kombinasi spektrum *UV-C* dan *UV-A* pada sistem TiO_2 dan grafit yang dapat meningkatkan jumlah foton, percepatan transfer elektron dan penurunan rekombinasi pasangan elektron-hole [15].

2.4 Proses Spektrum

Pada sistem MW-PEC, spektrum dari ultraviolet menghasilkan *photo-generated electron* tambahan yang dapat meningkatkan densitas arus efektif pada elektroda, sehingga produksi hidrogen meningkat. Hal ini dikarenakan sistem TiO_2 berbasis *UV* mampu menghasilkan reaksi yang dapat meningkatkan proses *water splitting*(Fujishima dan Honda). Dan *PEC* juga meningkatkan efisiensi sistem yang sangat dipengaruhi oleh spektrum cahaya, transfer muatan dan rekombinasi elektron-hole [20]. Pandangan ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan produksi hidrogen pada sistem TiO_2 berbasis *UV-PEC* dapat mencapai 20–70% tergantung intensitas cahaya, luas permukaan aktif dan morfologi material. Tetapi dalam kasus ini, didekati dengan asumsi konservatif $\eta \approx 25\%$ (peningkatan hidrogen).



Gambar 9. Proses *MW-PEC*

Produksi PEC di dekati :

$$R_{PEC} = \eta V(\text{H}_2) \quad (11)$$

Dimana :

R_{PEC} = Hasil peningkatan proses hidrogen

η = Efisiensi peningkatan hidrogen

$V(\text{H}_2)$ = Volume hidrogen dari elektrolisis

$R_{PEC} = 0.25 \times 1.04$

$= 0.26 \text{ L/h}$

Maka total produksi hidrogen sistem MW-PEC

$$R_{Total} = R_{PEC} + V(H_2) \quad (12)$$

Dimana :

R_{TOTAL} = jumlah keseluruhan proses elektrolisis dan fotolisis

R_{PEC} = Hasil peningkatan proses hidrogen

$V(H_2)$ = Volume hidrogen dari elektrolisis

$$R_{TOTAL} = 0.26 + 1.04$$

$$= 1.3 \text{ L/h}$$

Selain dengan cara peningkatan konservatif diatas, dapat juga didekati dengan penjumlahan total produksi hidrogen sebagai penjumlahan kontribusi fotolisis dan elektrolisis.

Jika:

Hasil fotolisis/PEC = 0,43 L/jam

Hasil elektrolisis = 1,04 L/jam

Maka :

$$V_{total} = V_{fotolisis} + V_{elektrolisis}$$

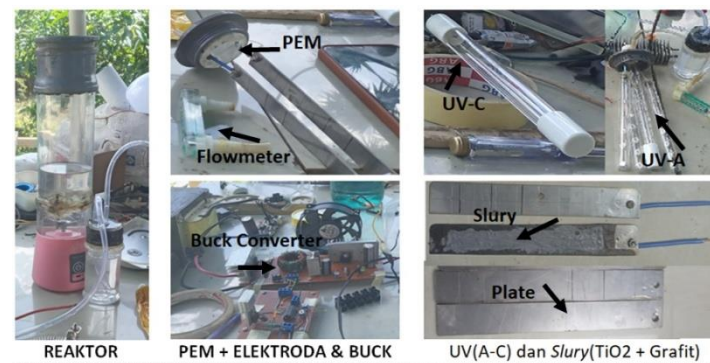
$$V_{total} = 0.43 + 1.04$$

$$V_{total} = 1.47 \text{ L/h}$$

Dengan demikian, maka kontribusi dari proses fotolisis sebesar 0,43 L/h dan produksi hidrogen elektrolisis sebesar 1,04 L/h, maka total produksi sistem MW-PEC mencapai 1,47 L/h.

3. PENGUJIAN

Untuk mengevaluasi kinerja reaktor dalam memproduksi gas hidrogen melalui integrasi energi daya listrik dan energi foton. Reaktor dengan kandungan aquades 715 mL beserta larutan KOH sebagai elektrolit alkali dengan tujuan meminimalkan hambatan listrik melalui mobilitas ion yang tinggi. Sementara penggunaan material elektroda *Stainless Steel* 316 berukuran total 90cm² dengan jarak anoda katoda 3 cm. Pemilihan *Stainless Steel* 316 dikarenakan stabilitas kimianya yang superior dalam lingkungan basa kuat selama proses evolusi gas [16]. Sedangkan pada anoda diberikan katalis berupa *slurry* berbasis TiO₂ dan grafit digunakan untuk memfasilitasi pemisahan muatan fotokatalitik.



Gambar 10. Hasil Rancangan

3.1 Tahapan Metodologi Pengujian

Tahap I: Validasi Elektrokimia (Variabel Daya Elektrolisis)

Pengujian dimulai dengan mengisolasi proses elektrolisis tanpa intervensi spektrum (kondisi gelap). Daya listrik divariasikan melalui arus ± 3 A dan pada tegangan dengan pengaturan $\pm 2,7$ VDC sampai 5 VDC [17].

Tahap II: Analisis Eksitasi Foton (Variabel Daya UV-A dengan UV-C Konstan)

Pada tahap ini, sistem elektrolisis dinonaktifkan (ditiadakan) untuk mengukur kontribusi fotolisis murni. Sumber radiasi UV-C (254 nm) dijaga konstan untuk memberikan energi foton tinggi sebesar 4,89 eV yang melampaui band gap TiO_2 (Eidsvåg). Secara simultan, daya *LED UV-A* (365 nm) divariasikan hingga dapat meningkatkan densitas flux foton (N) sesuai Persamaan [6;10].

Tahap III: Sinergi *Multi-Wavelength Photoelectrochemical (MW-PEC)*

Tahap akhir melibatkan penggabungan simultan antara daya elektrolisis variabel dan spektrum multi-wavelength (UV-C konstan + UV-A variabel). Fokus yang di uji adalah mengukur peningkatan densitas tegangan akibat *photo-generated electrons* tambahan. Berdasarkan teori [15], integrasi ini diharapkan dapat mengurangi laju rekombinasi elektron-hole melalui transfer muatan cepat pada antarmuka grafit-elektroda.

Tabel 1 Matriks Pengukuran

Pengujian	UV-C(254 nm)	UV-A(365 nm)	V Listrik UV-A (2.7 ;5)	Output Gas (menit)
Elektrolisis	OFF	OFF	± 3 A	Laju Gas (L/menit)
Fotolisis	Konstan(10W)	45 W	± 3 VA	Laju Gas (L/menit)
MW-PEC	Konstan(10W)	45 W	± 3 A	Laju Gas (L/menit)



Gambar 11. Pengujian UV dan Elektrolisis

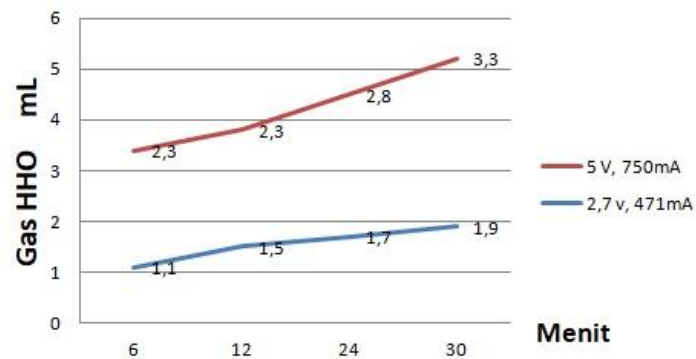
3.2 Hasil Pengujian

Pengujian **Elektrolisis** dengan Tegangan $\pm 2,7$ Vdc, arus dan 5 VDC serta arus $< \pm 1$ ampere, untuk HHO dalam mili liter permenit.

Tabel 2 Pengujian Elektrolisis

	Menit	6	12	24	30
2,7 Vdc, 471 mA		1,1	1,5	1,7	1,9
5 Vdc, 750 mA		2,3	2,3	2,8	3,3

Elektrolisis



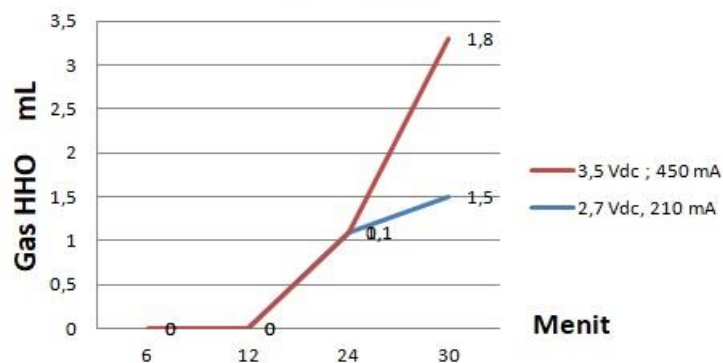
Gambar 12. Grafik Hasil Pengukuran HHO Elektrolisis

Pengujian **Fotolisis** dengan Tegangan $\pm 2,7$ Vdc, arus dan 3,5 VDC serta arus $< \pm 1$ ampere, untuk HHO dalam mili liter permenit.

Tabel 3 Hasil Pengukuran Fotolisis

	Menit	6	12	24	30
2,7 Vdc , 210 mA		0	0	1,1	1,5
3,5 Vdc, 450 mA		0	0	0	1,8

Fotolisis

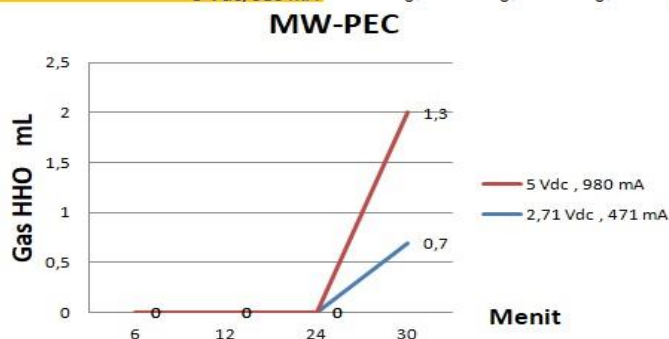


Gambar 13 Grafik Produksi Gas H₂ dan HHO dari Fotolisis

Pengujian **MW-PEC** dengan Tegangan $\pm 2,7$ Vdc, arus dan 5 VDC serta arus $< \pm 1$ ampere, untuk HHO dalam mili liter permenit.

Tabel 4 Hasil Pengukuran MW-PEC

Menit	6	12	24	30
2,7 Vdc, 471 mA	0	0		0,7
5 Vdc, 980 mA	0	0	0	1,3



Gambar 14 Grafik Produksi Gas H₂ dan HHO dari MW-PEC

3.3 Analisa



Gambar 15 Pengujian Elektrolisis, Fotolisis dan MW-PEC

Berdasarkan Gambar 14 dan pendekatan plat dengan luas permukaan sebesar 45 cm², bekerja dengan tegangan 2,7 Vdc sampai 5 Vdc maka terdapat kerapatan Arus (*Current Density*) sekitar 0,044 A/cm². Kerapatan ini sangat efektif untuk memecah molekul air, sehingga beban kerja plat sangat ringan dan material *stainless steel* akan terhindar dari korosi akibat erosi elektrokimia.

3.3.1 Pengujian Elektrolisis

Secara perhitungan hasil gas HHO dari proses elektrolisis aquades 715 mliter dengan KOH (tabel 2) selama 30 menit dengan tegangan sebesar 2,7 volt, arus 471mA = 1,9 mL dan 5 volt serta 750mA ampere = 3,3 mL dapat diperoleh jumlah gas H₂ dan O₂ berdasarkan pendekatan rumusan diatas.

Jika 471 mA didekati dengan jumlah mol gas, $Q = P \times t = (471\text{mA}) \times 1800 \text{ detik} = 847,8 \text{ colum.}$

Dan pendekatan ke dua dengan gas ideal $n_e = I \times t / F$ dimana F ditetapkan faraday 96.485, sehingga diperoleh $n_e = 847,8 / 96485 = 0,00879 \text{ mol elektron.}$

Selanjutnya gas ;

Hidrogen $n_e (\text{H}_2) = I \times t / 2 = 0,00439 \text{ mol,}$

Oksigen $n_e (\text{O}_2) = I \times t / 4 = 0,00220 \text{ mol.}$

Dengan demikian juga dengan cara diperoleh gas ideal (Volume), dimana $R = 0,0821$, $T = 298,15$, dan $P = 1$ untuk ;

$V(\text{H}_2) = 0,00439 \times 0,0821 \times 298,15 / 1 (\text{atom}) = 0,1074 \text{ liter dan}$

$V(\text{O}_2) = 0,00220 \times 0,0821 \times 298,15 / 1 (\text{atom}) = 0,0537 \text{ liter.}$

Total gas HHO = 0,1611 liter.

Jadi efisiensi sistem berdasarkan volume gas yang benar-benar tertangkap adalah

$$\eta = (1,9 / 160,8) \times 100\% = 1,18\%$$

untuk 750mA jumlah mol gas, $Q = P \times t = (750\text{mA}) \times 1800 \text{ detik} = 0,01399 \text{ coulomb}$.

gas ideal $n_e = I \times t / F$ dimana F ketetapan faraday 96.485, sehingga diperoleh

$$n_e = 847,8 / 96485 = 0,01399 \text{ mol elektron.}$$

Selanjutnya gas ;

$$\text{Hidrogen } n_e (\text{H}_2) = I \times t / 2 = 0,006995 \text{ mol,}$$

$$\text{Oksigen } n_e (\text{O}_2) = I \times t / 4 = 0,003497 \text{ mol.}$$

gas ideal (Volume) , dimana $R = 0,0821$, $T = 298,15$, dan $P = 1$ untuk ;

$$V(\text{H}_2) = 0,006995 \times 0,082057 \times 298,15 / 1 (\text{atom}) = 0,171 \text{ liter dan}$$

$$V(\text{O}_2) = 0,003497 \times 0,082057 \times 298,15 / 1 (\text{atom}) = 0,0856 \text{ liter.}$$

Total gas HHO = 0,257 liter.

Efisiensi sistem berdasarkan volume gas yang maximum, tertangkap adalah

$$\eta = (3,3 / 257) \times 100\% = 1,28\%$$

Tabel 5 Pengukuran Elektrolisis

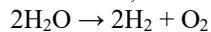
Parameter	2,7 V (340 mA)	3,5 V (750 mA)
Lama penyinaran	30 menit	30 menit
Gas total (HHO)	1,5 mL	1,8 mL
H ₂	1,0 mL	1,2 mL
O ₂	0,5 mL	0,6 mL
Mol H ₂	$4,46 \times 10^{-5} \text{ mol}$	$5,36 \times 10^{-5} \text{ mol}$
Mol O ₂	$2,23 \times 10^{-5} \text{ mol}$	$2,68 \times 10^{-5} \text{ mol}$
Massa H ₂	0,089 mg	0,107 mg

3.3.2 Pengujian Fotolisis

Perhitungan fotolisis ini dengan pendekatan berdasarkan hasil percobaan dan tidak didasari hukum Faraday olehkarena percobaan dan pengujian selama 30 menit ini, tidak terjadi elektrolisis tetapi fotolisis/fotokatalisis UV.

Tegangan = 2,7 Vdc dan arus = 340 mA, hasil gas = 1,5 mL sedangkan pada tegangan = 3,5 Volt dan arus = 750 mA, hasil gas = 1,8 mL.

Pada fotolisis air, reaksi yang terjadi adalah



maka perbandingan volume gas adalah

$$\text{H}_2 : \text{O} = 2 : 1$$

Campuran gas yang menjadi HHO, sehingga

$$\text{H}_2 = (3/2) \times V_{\text{gas}}$$

$$\text{O}_2 = (3/1) \times V_{\text{gas}}$$

Pengukuran 2,7 Vdc, arus 250mA, $V_{\text{gas}} = 1,5 \text{ mL}$

Hidrogen

$$\text{H}_2 = (2/3) \times 1,5 \text{ mL} = 1,00 \text{ mL}$$

Oksigen

$$\text{O}_2 = (1/3) \times 1,5 \text{ mL} = 0,50 \text{ mL}$$

$$\text{Total gas HHO} = 1,50 \text{ mL}$$

Pengukuran 3,5 Vdc, arus 450mA, $V_{\text{gas}} = 1,8 \text{ mL}$

Hidrogen

$$\text{H}_2 = (2/3) \times 1,8 \text{ mL} = 1,20 \text{ mL}$$

Oksigen

$$O_2 = (1/3) \times 1,8 \text{ mL} = 0,60 \text{ mL}$$

$$\text{Total gas HHO} = 1,80 \text{ mL}$$

Jika dihitung jumlah mol gas, menggunakan volume mol gas STP, 1 mol = 22,4 L. ;

$$n = (0,0015 / 22,4) = 6,70 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

sehingga

$$H_2 = 4,47 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

$$O_2 = 2,23 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

Pengukuran 3,5 Vdc, arus 450mA, Vgas = 1,8 mL

$$n = (0,0018 / 22,4) = 8,04 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

Sehingga

$$H_2 = 5,36 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

$$O_2 = 2,68 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

Efisiensi kenaikan produksi gas yang meningkat dari 1,5 → 1,8mL ;

$$\eta = (1,8 - 1,5 / 1,5) \times 100\% = 20\%$$

Jadi peningkatan tegangan dari 2,7 V menjadi 3,5 V meningkatkan produksi hanya $\eta = 20\%$.

Secara teori dengan 1.1 watt selama 1 jam(3600 detik), diperoleh 0.374 L/jam dengan asumsi 1800 detik maka terdapat 0,187 L/menit.

Jika dibandingkan dengan hasil pengukuran maksimal 1800 detik = 1,8 mL, maka presentasi produksi gas η ;

$$\eta = (0,0018 / 0,187) \times 100\% = 0,96 \%$$

dengan prsentasi selish peroleh gas , yakni ;

$$\eta = (0,187 - 0,0018 / 0,187) \times 100\% \approx 99,04$$

Pada kasus ini, tidak diterapkan elektroda untuk menguraikan air, tetapi melihat tegangan dan arus digunakan sebagai sumber daya bagi UV-A dan UV-C. Oleh karena itu, gas yang dihasilkan berasal dari proses fotolisis/fotokatalisis pada permukaan TiO₂ yang disinari ultraviolet.

Berdasarkan hasil pengukuran, penyinaran selama 30 menit menghasilkan gas total sebesar 1,5 mL pada kondisi 2,7 V–340 mA, sedangkan pada 3,5 V–750 mA menghasilkan 1,8 mL gas. Dengan asumsi seluruh gas merupakan hasil dekomposisi air, mengikuti stoikiometri reaksi fotolisis yaitu ; 66,7% H₂ dan 33,3% O₂. Dengan demikian, pada percobaan pertama diperoleh sekitar 1,00 mL H₂ dan 0,50 mL O₂, sedangkan pada percobaan kedua diperoleh sekitar 1,20 mL H₂ dan 0,60 mL O₂.

3.3.3 Pengujian MW-PEC

Tabel 6. Pengujian MW-PEC

Parameter	Pengujian 2,7 Vdc	Pengujian 5 Vdc
Tegangan	2,7 V	5 V
Arus	471 mA	980 mA
Waktu	30 menit	30 menit
Volume gas terukur	0,7 mL	1,3 mL
Elektrolit	KOH dalam 715 mL aquades	sama
Fotokatalis	TiO ₂ + grafit + Nafion 5%	sama
UV-A	45 W	45 W
UV-C	10 W	10 W

Berdasarkan pembahasan teori 2.3 , maka gas yang dihasilkan tetap terdiri dari ; Hidrogen (H₂) = 66,7% dan Oksigen (O₂) = 33,3%

Untuk pengukuran 2,7 Vdc dengan arus 471mA, menghasilkan gas 0,7 mL, maka ukuran hidrogen dan Oksigen ;

$$H_2 = (2/3) \times (0,7) = 0,467 \text{ mL}$$

$$O_2 = (1/3) \times (0,7) = 0,233 \text{ mL}$$

Untuk pengukuran 5 Vdc dan arus 980 mA, menghasilkan gas 1,3 mL, maka ukuran hidrogen dan oksigen ;

$$H_2 = (2/3) \times (1,3) = 0,867 \text{ mL}$$

$$O_2 = (1/3) \times (1,3) = 0,433 \text{ mL}$$

Efisiensi gas yang dihasilkan, jika diambil maximal. Maka tegangan 5 Vdc dengan arus 980 mA ;

$$\eta = (\text{Hasil metode baru}) / (\text{Hasil metode acuan}) \times 100\%$$

Di mana:

$$\eta = \text{efisiensi (\%)}$$

$$\text{hasil metode baru} = \text{volume HHO gabungan}$$

$$\text{hasil metode acuan} = \text{volume HHO elektrolisis murni}$$

$$\eta = (1,3 / 3,3) \times 100\% = 39,4\%$$

Masih, hanya sekitar 39,4% dari produksi elektrolisis.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini membandingkan produksi gas HHO menggunakan metode elektrolisis, fotolisis, dan gabungan elektrolisis-fotoelektrokatalisis (MW-PEC) dengan anoda berlapis *slurry* (TiO₂-grafit) menggunakan Nafion 5%. Pada elektrolisis murni diperoleh volume gas HHO sebesar 1,9 mL pada 2,7 V, 471 mA dan 3,3 mL pada 5 V, 471 mA selama 30 menit. Sedangkan fotolisis dengan tegangan = 2,7 Vdc dan arus = 340 mA, hasil gas = 1,5 mL dan pada tegangan = 3,5 Volt dan arus = 750 mA, hasil gas = 1,8 mL. Sementara itu, sistem gabungan menghasilkan 0,7 mL pada 2,7 V, 471 mA dan 1,3 mL pada 5 V, 980 mA.

Berdasarkan stoikiometri reaksi pemecahan air ($2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$), gas yang dihasilkan secara teoritis terdiri atas hidrogen dan oksigen dengan perbandingan volume 2:1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi fotoelektrokatalisis dan MW-PEC yang digunakan, belum mampu meningkatkan produksi gas dibandingkan elektrolisis murni. Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh rekombinasi elektron-hole, komposisi dan ketebalan lapisan TiO₂-grafit, lapisan *slurry*, distribusi penyinaran UV, serta desain reaktor yang masih memerlukan optimasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. United Nation(2015) - FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1.,Conference of the Parties Twenty-first session Paris, 30 November to 11 December 2015., " *ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT* ".
- [2]. Francesco La Camera(2021)., "*WORLD ENERGY TRANSITIONS OUTLOOK - 1.5° C PATHWAY*", The International Renewable Energy Agency (IRENA)., irena.org.,©IRENA 2021.
- [3]. Zhang, L., et al. (2020). Enhanced *photocatalytic hydrogen production using transition metal-doped TiO₂*. Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 12, No. 6, ISSN: 1941-7012, Article 064701.
- [4]. Turner, J. A. (2004). *Sustainable hydrogen production*. Science, Vol. 305, No. 5686, ISSN: 0036-8075, hlm. 972–974.
- [5]. Hisatomi, T., Kubota, J., & Domen, K. (2019). *Recent advances in semiconductors for photocatalytic and photoelectrochemical water splitting*. Chemical Society Reviews, Vol. 48, No. 1, ISSN: 0306-0012, hlm. 248–262.

- [6]. Zhang, Z., & Wang, P. (2019). *Highly stable copper oxide composite as an effective photocathode for water splitting*. Journal of Materials Chemistry A, Vol. 7, No. 5, ISSN: 2050-7488, hlm. 2236–2243.
- [7]. Kumar, S., & Devi, L. G. (2021). *Review on modified TiO₂ photocatalysis under UV/visible light*. Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 9, No. 1, ISSN: 2213-3437, Article 104118.
- [8]. Li, X., Yu, J., & Jaroniec, M. (2022). *Hierarchical photocatalysts for solar hydrogen production*. Chemical Reviews, Vol. 122, No. 1, ISSN: 0009-2665, hlm. 1–88.
- [9]. Singh, P., & Shukla, S. (2022). *Power management in renewable hydrogen production systems*. Energy Reports, Vol. 8, ISSN: 2352-4847, hlm. 234–245.
- [10]. Fujishima, A., & Honda, K. (1972). Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. Nature, Vol. 238, No. 5358, ISSN: 0028-0836, hlm. 37–38.
- [11]. Grätzel, M. (2001). Photoelectrochemical cells. Nature, Vol. 414, No. 6861, ISSN: 0028-0836, hlm. 338–344.
- [12]. Mikkel Rykær Kraglund, David Aili, Katja Jankova, Erik Christensen (2016)., Zero-Gap Alkaline Water Electrolysis Using Ion-Solvating Polymer Electrolyte Membranes at Reduced KOH Concentrations., Journal of The Electrochemical Society.
- [13]. Jörn Brauns and Thomas Turek (2020)., Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review., 8, 248; doi:10.3390/pr8020248
- [14]. Erlinawati, Mahesi, T. Z., Saputra, R., Febriana, I., & Effendy, S. A. (2025). *Pengaruh jumlah sel elektroda terhadap produksi gas hidrogen dengan proses elektrolisis sebagai sumber energi fuel cell*. Jurnal Teknik Kimia USU, 14(1). <https://doi.org/10.32734/jtk.v14i1.18064>.
- [15]. Ali Esrafil, Maryam Salimi, Ahmad Jonidi Jafari, Hamid Reza Sobhi, Mitra Gholami, Roshanak Rezaei Kalantary (2022)., *Pt-based TiO₂ photocatalytic systems: A systematic review*., Contents lists available at ScienceDirect Journal of Molecular Liquids., <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118685>.
- [16]. Bakhramov, S. K. U., & Ismailov, A. I. (2025). *Development and experimental characterization of a portable six-cell alkaline electrolyzer using 316L stainless steel electrodes*. Indian Journal of Chemical Technology, 33(2). <https://doi.org/10.56042/ijct.v33i2.23605>.
- [17]. Allen J. Bard dan Larry R. Faulkner (2001)., Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, Edisi ke-2, Wiley.
- [18]. Håkon Eidsvåg, Said Bentouba, Ponniah Vajeeston, Shivatharsiny Yohi, Dhayalan Velauthapilla (2021)., *TiO₂ as a Photocatalyst for Water Splitting—An Experimental and Theoretical Review*., <https://doi.org/10.3390/molecules26061687>
- [19]. Michael A. Henderson (2010)., *A Surface Science Perspective on Photocatalysis*., Surface Science Reports., Volume 66, Issues 6–7, hlm 185–297.
- [20]. Chen, X., & Mao, S. S. (2010). “Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Properties, Modifications, and Applications.” Chemical Reviews, 110(11), 6503–6570.
- [21]. Muhammad Harun Rashid (1988), Power Electronics, Circuits, Devices, and Applications., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- [22]. Ali Javed, Niklas L. Wolf, Fabian Meyer, Leander Treutlein, Hans Kungl, André Karl, Eva Jodät, Rüdiger-A. Eichel., "Exploring the state-of-operation of proton exchange membrane electrolyzers", International Journal of Hydrogen Energy., <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924052510>