Energi dan Kelistrikan: Jurnal Ilmiah
Vol. 14, No. 2, Juli - Desember 2022, P-ISSN 1979-0783, E-ISSN 2655-5042
https://doi.org/10.33322/energi.v14i2.1646

Analisis Komparasi Jenis Teknologi Elektrolisis Hidrogen Sebagai Alternatif Energi Bersih di Indonesia

Nabila Asyifa Cabriani Lestari [1]; Wahyu Ardie Nugroho [2]; Herminarto Nugroho [1*)]

1. Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Pertamina, Kebayoran Lama, Jakarta Selatan 12220, Indonesia
2. PT. Pertamina (Persero), Gambir, Jakarta Pusat, DKI Jakarta 10110, Indonesia

*)*Email: herminarto.nugroho@universitaspertamina.ac.id*

Received: 18 April 2022 | Accepted: 31 Desember 2022 | Published: 01 Januari 2023

Abstract

Hydrogen is one of the clean energy alternatives that can be applied in Indonesia. But hydrogen needs to be produced because it is unavailable in nature in the wild. One way to produce hydrogen is through electrolysis. There are several types of electrolysis technology available currently and each has its advantages and disadvantages. From some of these technologies, two types of most suitable to be applied in Indonesia are Solid Oxide Electrolysis Cell (SOEC) and Membrane Free Electrolysis (MFE). The selection of these two technologies takes into account the level of electrical efficiency and potential of existing energy sources in Indonesia. SOEC that works by utilizing high temperatures is very suitable to be applied in conjunction with geothermal power plants. While MFE has high electrical efficiency and maintenance costs are relatively cheaper, so it is suitable to be applied by utilizing solar power.

Keywords: *Hydrogen, Electrolysis, Solid Oxide Electrolysis Cell, Membrane Free Electrolysis*

Abstrak

Hidrogen merupakan salah satu alternatif energi bersih yang dapat diaplikasikan di Indonesia. Tapi hidrogen perlu diproduksi dikarenakan tidak tersedia di alam secara bebas. Salah satu cara memproduksi hidrogen adalah melalui proses elektrolisis. Ada beberapa jenis teknologi elektrolisis yang tersedia pada saat ini dan masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Dari beberapa teknologi ini, dipilih dua jenis yang paling sesuai untuk diterapkan di Indonesia, yaitu Solid Oxide Electrolysis Cell (SOEC) dan Membrane Free Electrolysis (MFE). Pemilihan dua teknologi ini mempertimbangkan tingkat efisiensi kelistrikan dan potensi sumber energi yang ada di Indonesia. SOEC yang bekerja dengan memanfaatkan suhu tinggi sangat cocok diaplikasikan bersandingan dengan pembangkit listrik tenaga panas bumi. Sedangkan MFE memiliki efisiensi kelistrikan yang tinggi dan biaya maintenance yang relatif lebih murah sehingga cocok diaplikasikan dengan memanfaatkan tenaga surya.

Kata kunci: *Hidrogen, Elektrolisis, Solid Oxide Electrolysis Cell, Membrane Free Electrolysis*

Vol. 14, No. 2, Juli - Desember 2022, P-ISSN 1979-0783, E-ISSN 2655-5042
https://doi.org/10.33322/energi.v14i2.1646

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi di Indonesia semakin meningkat seiring perkembangan teknologi. Di Indonesia, salah satu industri yang masih menguasai pemenuhan kebutuhan energi nasional adalah industri minyak dan gas [1], hal tersebut dipengaruhi oleh ketergantungan penggunaan bahan bakar mencakup minyak dan gas bumi serta pemanfaatan sumber energi terbarukan yang belum optimal. Namun dengan memburuknya kondisi bumi saat ini, diperlukan adanya energi alternatif baru yang lebih ramah lingkungan dan menghasilkan lebih sedikit emisi karbon.

Hidrogen adalah salah satu alternatif yang memiliki potensi untuk menjadi bahan penyimpan energi (*energy carrier*) maupun bahan pengolah emisi karbon agar tidak terbuang dan mencemari bumi [2]. Hidrogen bersih, khususnya *green* dan *blue hydrogen*, dapat diproduksi melalui proses elektrolisis yang bekerja dengan mengaliri air atau larutan lainnya yang mengandung ion hidrogen dengan arus listrik yang akan memisahkan H^+ dengan senyawa yang mengikatnya di awal [3]. Proses ini dibutuhkan karena unsur hidrogen adalah salah satu unsur yang paling reaktif sehingga jarang ditemukan secara bebas di alam. Elektrolisis hidrogen memungkinkan adanya proses produksi hidrogen yang memanfaatkan energi bersih ataupun mendaur ulang zat buangan agar mengurangi pencemaran lingkungan. Selain itu, Hidrogen juga dapat menghasilkan listrik dengan menggunakan teknologi *fuel cell* tanpa menghasilkan zat buangan apa pun selain air [4].

Teknologi elektrolisis sendiri sebenarnya bukanlah suatu hal yang baru. Namun penelitian untuk bisa menekan biaya dan meningkatkan efisiensi serta produksinya terus berkembang dan membuka peluang hidrogen sebagai salah satu alternatif untuk mengurangi emisi karbon dunia. Hidrogen dapat dimanfaatkan sebagai *energy storage* dan digunakan kembali untuk menghasilkan listrik melalui teknologi *fuel cell*, selain itu dapat juga dijadikan bahan bakar sintetik dengan menggabungkan kembali emisi karbon buangan industri dengan hidrogen yang dihasilkan.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Studi Literatur

2.1.1. Elektrolisis

Elektrolisis merupakan suatu proses yang sudah ditemukan sejak tahun 1820 oleh Faraday [1] [5] [6]. Elektrolisis berfungsi untuk memecah suatu senyawa kimia dengan mengaliri senyawa tersebut dengan listrik. Hal ini menjadikan proses elektrolisis sebagai salah satu alternatif metode produksi senyawa kimia, salah satunya hidrogen. Dalam perkembangannya teknologi elektrolisis terpecah menjadi beberapa jenis yang dibedakan berdasarkan struktur alat maupun reaksi kimia yang terjadi.

2.1.2. Alkaline Konvensional

Teknologi elektrolisis alkali konvensional merupakan teknologi elektrolisis tertua di antara semua teknologi elektrolisis yang ada [7]. Jenis elektrolisis ini menggunakan *electrolyzer* yang memiliki dua elektroda yang beroperasi pada elektrolit alkali cair berupa larutan KOH atau NaOH. Kedua elektroda ini dipisahkan oleh sebuah diafragma yang berperan sebagai membran pemisah gas produk dan mentranspor ion OH^- dari satu elektroda ke elektroda lainnya [8]. Walaupun memiliki kekurangan seperti menghasilkan limbah *potassium peroxide* dan hanya bisa beroperasi dengan beban yang rendah.

2.1.3. *Proton Exchange Membrane* (PEM)

Elektrolisis menggunakan metode *Proton Exchange Membrane* adalah teknologi elektrolisis yang dikembangkan untuk mengatasi kekurangan yang dimiliki teknologi elektrolisis alkaline

Vol. 14, No. 2, Juli - Desember 2022, P-ISSN 1979-0783, E-ISSN 2655-5042
https://doi.org/10.33322/energi.v14i2.1646

konvensional. Teknologi PEM dapat bekerja dengan baik, dapat menghasilkan gas hidrogen yang murni dan memiliki tingkat efisiensi yang cukup tinggi, tetapi memiliki kekurangan dari segi keekonomisannya. Hal ini disebabkan oleh diperlukannya logam mulia sebagai penyusunnya, seperti Iridium di katalis anodanya, platinum di katodanya, dan separatornya yang terbuat dari titanium yang dilapisi oleh emas atau platinum [9].

2.1.4. *Anion Exchange Membrane* (AEM)

Teknologi elektrolisis *Anion Exchange Membrane* saat ini hanya diproduksi oleh Enapter. AEM berhasil menggabungkan kelebihan kedua teknologi pendahulunya, yaitu PEM dan alkaline konvensional, namun memiliki efisiensi kelistrikan yang termasuk rendah. AEM bekerja menggunakan air yang mengalir dari anodanya melalui membran, kemudian hidrogen akan dihasilkan di katoda yang kering dan dilepaskan melalui *gas diffusion layer*. Selanjutnya ion OH^- sisa pemecahan air tadi akan kembali ke anoda melalui membran dan membentuk O_2 di anoda yang kemudian dilepaskan melalui *gas and liquid diffusion layer*.

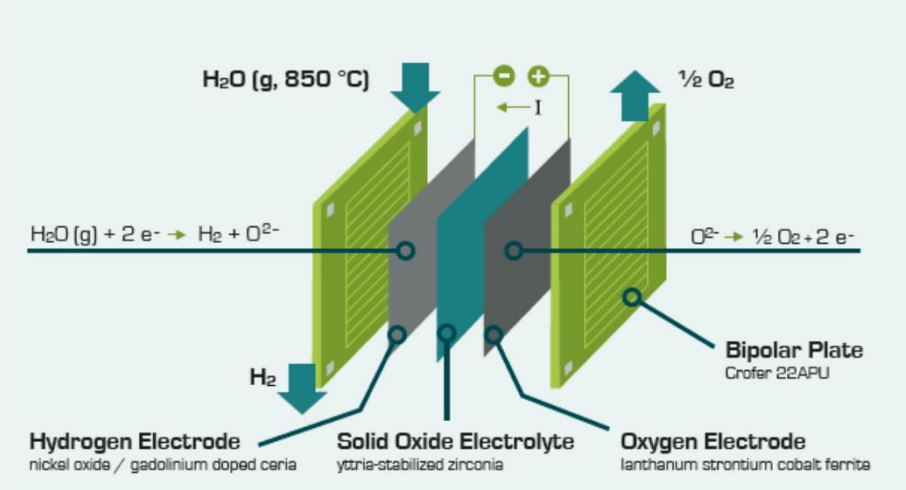
2.1.5. *Solid Oxide Electrolysis Cell* (SOEC)

Solid Oxide Electrolysis Cell yang menggunakan bahan keramik padat sebagai elektrolit yang secara selektif menghantarkan ion oksigen bermuatan negatif (O^{2-}) pada suhu tinggi, menghasilkan hidrogen dengan cara yang sedikit berbeda. Uap di katoda bergabung dengan elektron dari sirkuit eksternal untuk membentuk gas hidrogen dan ion oksigen bermuatan negatif. Selanjutnya ion oksigen melewati membran keramik padat dan bereaksi di anoda untuk membentuk gas oksigen dan menghasilkan elektron untuk sirkuit eksternal [10].

SOEC harus beroperasi pada suhu yang cukup tinggi agar membran oksida padat berfungsi dengan baik (sekitar 700–1000°C), hal ini membuat efisiensi SOEC sangat tinggi, namun membuat sisi mekanis dari sistem SOEC lebih mudah rusak karena beroperasi pada suhu yang tinggi secara terus-menerus. Operasi SOEC ini dapat secara efektif menggunakan panas yang tersedia (dari berbagai sumber, termasuk energi panas bumi dan energi nuklir) untuk mengurangi jumlah energi listrik yang dibutuhkan untuk menghasilkan hidrogen dari air.

Selain itu keunikan SOEC lainnya adalah kemampuannya untuk bekerja dalam dua arah. Sehingga memungkinkan SOEC untuk berubah menjadi SOFC yang mengubah hidrogen menjadi listrik tanpa memerlukan fuel cell terpisah [10]. Bagian-bagian dari SOEC dapat dilihat pada Gambar 1 [11].

Vol. 14, No. 2, Juli - Desember 2022, P-ISSN 1979-0783, E-ISSN 2655-5042
https://doi.org/10.33322/energi.v14i2.1646



Gambar 1. Struktur *Solid Oxide Electrolysis Cell* (SOEC)

Jika diketahui persamaan reaksi yang terjadi adalah:

$$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-} \quad (1)$$

$$O^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \quad (2)$$

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2 \quad (3)$$

Dengan diketahui bahwa A_r (massa atomik) masing-masing unsur, untuk menghitung massa molar (M_r), yaitu: H=1 dan O=16, maka dapat dihitung jumlah mol 100 kg H_2 hasil produksi, yaitu:

$$jumlah\ mol = \frac{massa}{massa\ molar} \quad (4)$$

$$jumlah\ mol = \frac{100000\ g}{2 \times A_{r_H}} = \frac{100000\ g}{2 \times 1\frac{g}{mol}} = 50000\ mol$$

Sehingga berdasarkan persamaan (3), dengan asumsi efisiensi reaksi 100%, dapat diperoleh jumlah mol masing-masing senyawa.

$2H_2O$	→	$2H_2$	+	O_2
50000 mol		50000 mol		25000 mol

Sehingga jumlah air yang dibutuhkan dapat dihitung:

$$massa_{H_2O} = jumlah\ mol_{H_2O} \times M_{r_{H_2O}} \quad (5)$$

$$massa_{H_2O} = 50000\ mol \times \left(\left(2 \times A_{r_H}\right) + \left(1 \times A_{r_O}\right)\right)$$

$$massa_{H_2O} = 50000\ mol \times \left((2 \times 1) + (1 \times 16)\right)\frac{g}{mol} = 900\ kg$$

Energi dan Kelistrikan: Jurnal Ilmiah
Vol. 14, No. 2, Juli - Desember 2022, P-ISSN 1979-0783, E-ISSN 2655-5042
https://doi.org/10.33322/energi.v14i2.1646

Sedangkan jumlah oksigen yang diperoleh melalui reaksi ini adalah sebesar:

$$massa_{O_2} = jumlah\ mol_{O_2} \times M_{r_{O_2}} \quad (6)$$

$$massa_{O_2} = 25000\ mol \times \left(2 \times \left(16 \frac{g}{mol}\right)\right) = 800\ kg$$

Faktor efisiensi yang digunakan adalah sebesar 80%, sehingga untuk dapat menghasilkan 100 kg hydrogen dibutuhkan jumlah air sebenarnya yang dihitung berdasarkan persamaan (7).

$$Efficiency\ factor = \frac{massa\ air\ ideal}{massa\ air\ sebenarnya} \quad (7)$$

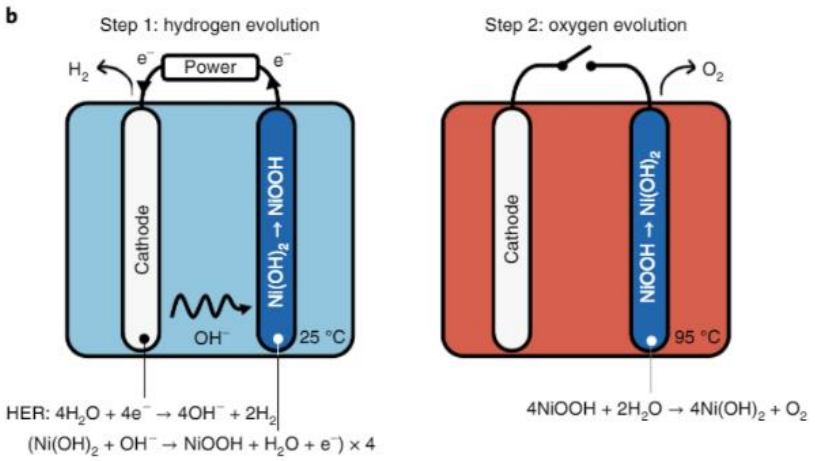
$$80\% = \frac{900\ kg}{massa\ air\ sebenarnya}$$

$$massa\ air\ sebenarnya = \frac{900\ kg}{80\%} = 1125\ kg$$

2.1.6. *Membrane Free Electrolysis*

Membrane Free Electrolysis adalah suatu teknologi elektrolisis yang alat *electrolyzer*nya tidak menggunakan membran untuk memisahkan produknya.Teknologi ini dikembangkan untuk mengatasi permasalahan yang dimiliki oleh teknologi *electrolyzer* sebelumnya, khususnya di faktor tingkat keekonomisan teknologi tersebut. Berdasarkan Tabel 1, terdapat dua perusahaan yang mengusung teknologi ini, H2Pro dan CPH2 (*Clean Power Hydrogen*). Keduanya memiliki prinsip kerja yang mirip, namun urutan produk yang dihasilkan berkebalikan. Pada laporan ini, hanya teknologi MFE milik H2Pro yang akan dibahas.

Teknologi MFE milik H2Pro diberi nama E-TAC (*Electrochemical, Thermally Activated Chemical*). Nama ini menggambarkan cara kerja *electrolyzer* yang diusung oleh perusahaan ini, yaitu bekerja dalam dua step, memanfaatkan listrik dan kenaikan suhu untuk menghasilkan hidrogen. Kedua step ini dapat dilihat pada Gambar 2 [12].



Gambar 2. *Electrochemical, Thermally Activated Chemical (E-TAC) Two Step Electrolysis*

Vol. 14, No. 2, Juli - Desember 2022, P-ISSN 1979-0783, E-ISSN 2655-5042
https://doi.org/10.33322/energi.v14i2.1646

E-TAC memiliki katoda yang terbuat dari mesh baja tahan karat berlapis nikel yang sudah diplatinisasi, sedangkan anodanya terbuat dari bahan yang dapat bereaksi dengan air pada saat proses pemisahan molekul dilakukan. E-TAC memisah molekul air dengan dua langkah yang berurutan. Langkah pertama yang dilakukan adalah proses evolusi hidrogen yang terdiri dari penyaluran listrik (penambahan elektron) untuk memecah air pada suhu 25°C menjadi gas hidrogen di katoda secara elektrokimia. Hidrogen ini kemudian akan dilepaskan sebagai produk utama dari proses ini, sedangkan ion OH^- sisa pemisahan dari air akan bergerak menuju anoda yang terbuat dari $Ni(OH)_2$ dan kemudian bereaksi secara kimia dengan anodanya sehingga mengubah bahan anoda menjadi NiOOH. Persamaan reaksi yang terjadi pada proses evolusi hidrogen dapat dilihat pada persamaan (8) sampai persamaan (10).

HER (Hydrogen Evolution Reaction): $$4H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- + 2H_2 \quad (8)$$

$$(Ni(OH)_2 + OH^- \rightarrow NiOOH + H_2O + e^-) \times 4 \quad (9)$$

$$4Ni(OH)_2 + 4H_2O \rightarrow 4NiOOH + 2H_2 + 4H_2O \quad (10)$$

Berdasarkan persamaan (4), diketahui bahwa terdapat 50000 mol dalam 100 kg hidrogen. Sehingga jumlah mol masing-masing senyawa pada persamaan (5.10) adalah sebagai berikut:

$4Ni(OH)_2$	$4H_2O$	$\rightarrow$	$4NiOOH$	+	$2H_2$	+	$4H_2O$
100000 mol	100000 mol		100000 mol		50000 mol		100000 mol

Maka jumlah air yang dibutuhkan pada tahap pertama ini dapat dihitung:

$$massa_{H_2O} = jumlah\ mol_{H_2O} \times M_{r_{H_2O}} \quad (11)$$

$$massa_{H_2O} = 100000\ mol \times \left(\left(2 \times A_{r_H}\right) + \left(1 \times A_{r_O}\right)\right)$$

$$massa_{H_2O} = 100000\ mol \times \left((2 \times 1) + (1 \times 16)\right)\frac{g}{mol} = 1800\ kg$$

Faktor efisiensi yang digunakan adalah sebesar 95%, sehingga untuk dapat menghasilkan 100 kg hydrogen dibutuhkan jumlah air sebenarnya yang dihitung berdasarkan persamaan (7).

$$95\% = \frac{1800\ kg}{massa\ air\ sebenarnya}$$

$$massa\ air\ sebenarnya = \frac{1800\ kg}{95\%} = 1894{,}737\ kg$$

Pada langkah kedua, suplai listrik akan diputus dan air sisa akan dikuras dan digantikan dengan air baru yang bersuhu 95°C untuk memicu reaksi selanjutnya di anoda. Reaksi yang terjadi di anoda adalah proses evolusi oksigen yang mengubah NiOOH menjadi $Ni(OH)_2$ kembali dengan memanfaatkan suhu air yang tinggi (*thermally activated*). Persamaan reaksi yang terjadi pada proses evolusi oksigen dapat dilihat pada persamaan (12).

OER (Oxygen Evolution Reaction): $$4NiOOH + 2H_2O \rightarrow 4Ni(OH)_2 + O_2 \quad (12)$$

Berdasarkan persamaan (10), diketahui bahwa terdapat 100000 mol NiOOH dalam reaksi ini. Sehingga jumlah mol masing-masing senyawa pada persamaan (12) dapat ditentukan sebagai berikut:

Vol. 14, No. 2, Juli - Desember 2022, P-ISSN 1979-0783, E-ISSN 2655-5042
https://doi.org/10.33322/energi.v14i2.1646

$$\underset{100000\ \text{mol}}{4NiOOH} + \underset{50000\ \text{mol}}{2H_2O} \rightarrow \underset{100000\ \text{mol}}{4Ni(OH)_2} + \underset{25000\ \text{mol}}{O_2}$$

Berdasarkan jumlah mol, jumlah air yang dibutuhkan pada tahap kedua dapat dihitung:

$$massa_{H_2O} = jumlah\ mol_{H_2O} \times M_{r_{H_2O}} \quad (13)$$

$$massa_{H_2O} = 50000\ mol \times \left((2 \times A_{r_H}) + (1 \times A_{r_O})\right)$$

$$massa_{H_2O} = 50000\ mol \times \left((2 \times 1) + (1 \times 16)\right)\frac{g}{mol}$$

$$massa_{H_2O} = 900000\ gram = 900\ kg$$

Sedangkan jumlah oksigen yang diperoleh melalui reaksi ini adalah sebesar:

$$massa_{O_2} = jumlah\ mol_{O_2} \times M_{r_{O_2}} \quad (14)$$

$$massa_{O_2} = 25000\ mol \times \left(2 \times \left(16\frac{g}{mol}\right)\right)$$

$$massa_{O_2} = 25000\ mol \times 32\frac{g}{mol}$$

$$massa_{O_2} = 800000\ gram = 800\ kg$$

Faktor efisiensi yang digunakan adalah sebesar 95%, sehingga untuk dapat menghasilkan 800 kg oksigen dibutuhkan jumlah air sebenarnya yang dihitung berdasarkan persamaan (5.7).

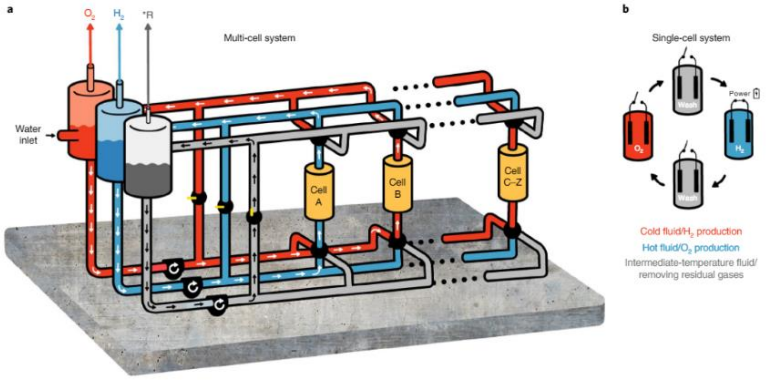
$$95\% = \frac{900\ kg}{massa\ air\ sebenarnya}$$

$$massa\ air\ sebenarnya = \frac{900\ kg}{95\%}$$

$$massa\ air\ sebenarnya = 947{,}368\ kg$$

Dalam skala besar, dibutuhkan lebih dari satu sel *electrolyzer* untuk memproduksi hydrogen sesuai dengan target. Suatu sistem *multi-cell* terdiri dari sel-sel elektrolisis, *water inlet*, *hydrogen tank*, *oxygen tank*, dan *residual gases tank* yang tersambung melalui pipa-pipa berkatup. Skematik sistem *multi-cell electrolyzer* yang digunakan oleh E-TAC dapat dilihat pada Gambar 3 [12].

Vol. 14, No. 2, Juli - Desember 2022, P-ISSN 1979-0783, E-ISSN 2655-5042
https://doi.org/10.33322/energi.v14i2.1646



Gambar 3. Skematik sistem multi-cell electrolyzer E-TAC

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perkembangan teknologi elektrolisis memperluas metode, bahan, dan struktur yang dapat digunakan untuk mengelektrolisis suatu larutan untuk menghasilkan hidrogen. Hal ini berdampak pada banyaknya jenis teknologi elektrolisis yang dapat digunakan, menyesuaikan dengan kondisi negara maupun industri masing-masing. Berikut pada Tabel 1 tercatat beberapa poin penting mengenai beberapa jenis *electrolyzer* yang mencakup perusahaan yang memproduksi, tingkat efisiensinya, kelebihan, serta kekurangannya [13, 12, 14].

Tabel 1 Komparasi Teknologi Elektrolisis Hidrogen

Technology	Manufacturer	Electrical Efficiency (%)	Advantages	Disadvantages
Conventional Alkaline Electrolysis	-	65-71	Low Capital Cost	Potassium hydroxide waste
			High durability	low current density
			High gas purity	limited ability to operate at low loads
				the inability to operate at high pressure
PEM (Proton Exchange Membrane) Electrolysis	Giner, General Electric	63-68	high current densities	High Capital Cost (expensive electrode catalysts)
			very high gas purity	High Maintenance cost
			no waste	Complex structure (hard to repair)
			modular and compact size	
AEM (Anion Exchange Membrane) Electrolysis	Enapter	62.5	modular and compact size	The low alkaline stability
			Low Capital Cost	The ionic resistance of AEMs needs to be decreased, while retaining a low permeability for hydrogen.
			High gas purity	still needs alkaline
			Completely deionized water is not needed	
SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell)	Sunfire	77-84	long term stability	long start-up times
			high efficiency (not limited by Carnot efficiency)	long break-in times
			fuel flexibility	mechanical compatibility issues
			low emissions	chemical stability issues
			low operating costs	

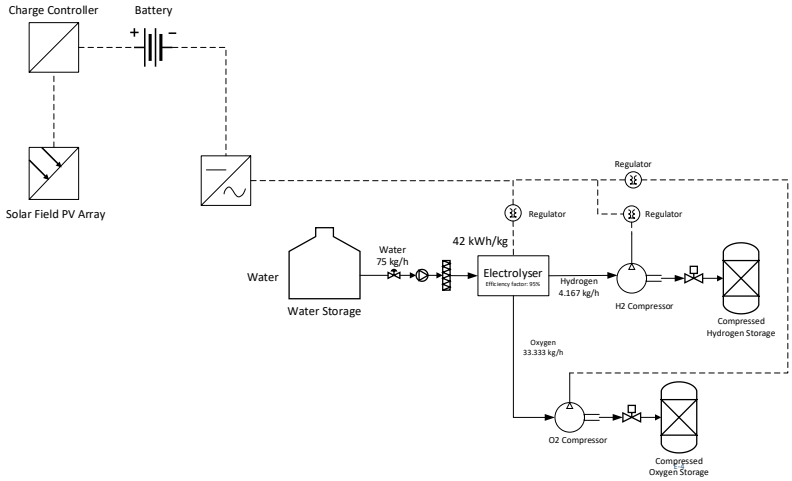
Vol. 14, No. 2, Juli - Desember 2022, P-ISSN 1979-0783, E-ISSN 2655-5042
https://doi.org/10.33322/energi.v14i2.1646

Membrane Free Electrolysis	E-TAC	H2Pro	95	costs approximately 50% lower	not available in industrial size yet
				modular	
				doesn't need any membrane	
				consumes less electricity	
	2 Step Electrolysis	Ergosup	-	able to produce medical grade Oxygen	not available in industrial size yet
				doesn't need any membrane	
				consumes less electricity	

Mengacu pada target Indonesia untuk mengembangkan generasi listrik bersumber tenaga surya dan panas bumi, maka dapat disimpulkan teknologi pada Tabel 1 yang paling cocok untuk diaplikasikan di Indonesia adalah teknologi SOEC milik *Sunfire* yang bersinergi dengan baik dengan pembangkit listrik tenaga panas bumi dan teknologi *membrane free electrolysis* yang dapat dipasangkan dengan pembangkit listrik tenaga surya.

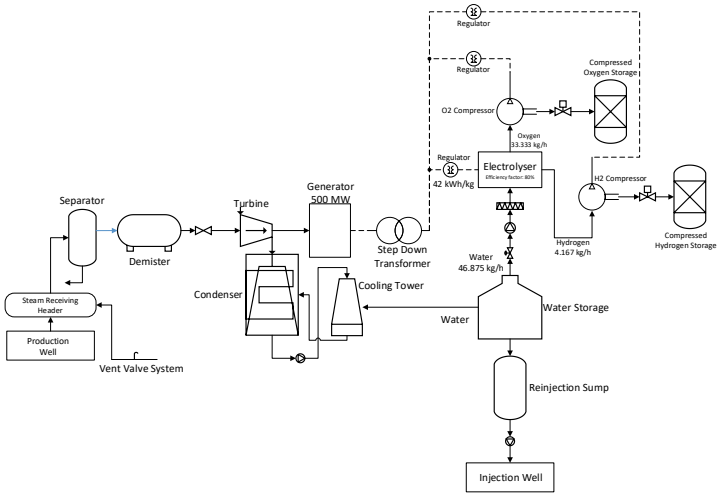
SOEC milik *Sunfire* dikatakan cocok untuk diaplikasikan pada pembangkit listrik tenaga panas bumi dikarenakan kondisi operasinya yang membutuhkan suhu tinggi yang dapat disediakan oleh *plant* pembangkit listrik tenaga panas bumi, dimana hal ini berdampak pada tingginya *electrical efficiency* produksi hidrogen. Sedangkan teknologi *membrane free electrolysis* dipilih karena merupakan teknologi terbaru yang dapat mengurangi biaya *maintenance* dan produksi karena tidak memiliki membran. E-TAC milik H2Pro lebih dianjurkan oleh penulis dikarenakan informasi yang tersedia, baik dari perusahaannya maupun jurnal publikasi yang membahas teknologi E-TAC, lebih banyak dibandingkan *2 step electrolysis* yang diusung oleh Ergosup. Selain itu, teknologi *membrane free electrolysis* sendiri belum tersedia dalam ukuran industrial saat ini, yang tidak akan menjadi masalah karena Indonesia sendiri baru memulai fase peralihannya ke energi baru terbarukan, sehingga memiliki banyak potensi hubungan timbal balik positif yang mungkin bisa dilakukan oleh negara dan perusahaan yang mengembangkan teknologi ini, H2Pro.

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, maka dapat disusun *process flow diagram* dari *solar powered green hydrogen production plant* dan *geothermal powered green hydrogen production plant* seperti yang terlihat pada Gambar 4 dan 5.



Gambar 4. *Process Flow Diagram Solar Powered Green Hydrogen Production Plant*

Vol. 14, No. 2, Juli - Desember 2022, P-ISSN 1979-0783, E-ISSN 2655-5042
https://doi.org/10.33322/energi.v14i2.1646



Gambar 5. *Process Flow Diagram Geothermal Powered Green Hydrogen Production Plant*

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Terdapat berbagai upaya untuk mencari alternatif energi baru yang lebih bersih dan dapat mengurangi emisi karbon. Salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan melakukan pemetaan teknologi elektrolisis yang paling sesuai untuk diaplikasikan di Indonesia dalam rangka mengembangkan produksi dan ekosistem hidrogen di Indonesia. Dengan menyesuaikan antara potensi energi yang sudah ada dan prospek perkembangan teknologi hidrogen yang ada di dunia, dapat ditentukan dua teknologi yang paling cocok untuk diimplementasikan yaitu, *membrane free electrolysis* (MFE) dan *solid oxide electrolysis cell* (SOEC).

Mengingat teknologi ini masih sangat baru dan masih dalam tahap pengembangan, Indonesia tidak perlu terburu-buru memaksakan untuk mengimplementasikan teknologi ini. Perlu dilakukan studi lebih lanjut dengan menimbang kondisi ekosistem hidrogen di Indonesia di beberapa tahun ke depan sebelum benar-benar diimplementasikan, terlebih jika mengingat bahwa teknologi ini masih baru akan diterapkan berskala industrial di negara-negara maju dalam kurun dua sampai lima tahun ke depan. Sehingga sebaiknya Indonesia mempersiapkan terlebih dahulu ekosistem hidrogen ini guna memperhalus transisi yang akan terjadi dalam waktu dekat ini.

Selain itu mengingat rendahnya efisiensi penggunaan hidrogen, sebaiknya Indonesia mengaplikasikan hidrogen hanya dalam sektor-sektor yang dapat langsung berdampak secara luas. Sektor yang sekiranya cocok untuk diaplikasikan adalah sektor industri minyak dan gas serta kendaraan umum ataupun kendaraan industrial seperti truk. Hal ini dikarenakan banyaknya tahapan yang harus dilewati untuk menggunakan hidrogen terlalu berlebihan jika hanya untuk diimplementasikan dalam cakupan individu.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Badaruddin, Dinamika Industri Migas dan Pertambangan di Indonesia, Universitas Bakrie, 2018.

[2] A. a. R. A. a. B. A. a. F. O. Zuttel, “Hydrogen: the future energy carrier,” Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2010.

[3] A. a. G. L. M. a. S. P. Ursua, “Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends,” Proceedings of the IEEE, 2011.

[4] A. Hasan, “Aplikasi sistem fuel cell sebagai energi ramah lingkungan di sektor transportasi dan pembangkit,” Jurnal Teknologi Lingkungan, 2011.

Vol. 14, No. 2, Juli - Desember 2022, P-ISSN 1979-0783, E-ISSN 2655-5042
https://doi.org/10.33322/energi.v14i2.1646

[5] Andersen dan Fjellvåg, "Elektrolyse," dalam Store Norske Leksikon, Store Norske Leksikon, 2010.

[6] E. a. V. E. a. L. N. a. C. C. N. a. K. G. N. Zoulias, "A review on water electrolysis," Tcjst, 2004.

[7] Y. K. a. S. S. a. S. H. Sofi'i, "Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Asam Sulfat dan Aluminium Foil Layer," Prosiding SENTRA (Seminar Teknologi dan Rekayasa), 2021.

[8] A. Isao, "ALKALINE WATER ELECTROLYSIS," ENERGY CARRIERS AND CONVERSION SYSTEMS, vol. I.

[9] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel dan D. Stolten, "A comprehensive review on PEM water electrolysis," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 38, no. 12, p. 4901–4934, 2013.

[10] International Energy Agency, "The Future of Hydrogen," IEA Publications, Karuizawa, 2019.

[11] Sunfire, "GrInHy2.0 - GREEN INDUSTRIAL HYDROGEN," 16 April 2021. [Online]. Available: https://www.green-industrial-hydrogen.com/fileadmin/user_upload/210416_GrInHy2.0_Flyer_v5.pdf. [Diakses 9 November 2021].

[12] H. Dotan, A. Landman, S. W. Sheehan, K. D. Malviya, G. E. Shter, D. A. Grave, Z. Arzi, N. Yehudai, M. Halabi, N. Gal, N. Hadari, C. Cohen, A. Rothschild dan G. S. Grader, "Decoupled hydrogen and oxygen evolution by a two-step electrochemical–chemical cycle for efficient overall water splitting," Nature Energy, vol. 4, pp. 786-795, 2019.

[13] Enapter, "Energy Forum - Enapter AEM," 2 Juni 2021. [Online]. Available: https://www.energyforum.in/fileadmin/user_upload/india/media_elements/Presentations/20210602_Decentralized_H2/02_Enapter_Hydrogen.pdf. [Diakses 2 November 2021].

[14] Sunfire, "Sunfire," Sunfire, [Online]. Available: https://www.sunfire.de/en/hydrogen#content_soec. [Diakses 9 November 2021].

[15] Enapter, "AEM Water Electrolysis: How it Works," Enapter, 20 Oktober 2020. [Online]. Available: https://www.enapter.com/newsroom/aem-water-electrolysis-how-it-works. [Diakses 19 Oktober 2021].