

Analisa Tingkat Kebocoran dan Efisiensi Fuel Cell pada Module UniTrain-I

Yonki Alexander Volta¹, Nofiansyah², dan Dyah Utari Y³

^{1,2,3}Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Sriwijaya

Jl. Srijaya Negara, Bukit Besar, Kota Palembang, Sumatera Selatan 30139 Indonesia

yonki.alexander.volta@polsri.ac.id¹, nofiansah@polsri.ac.id², dyah.utari.yusa@polsri.ac.id³

Abstrak— Penelitian ini mengkaji tingkat kebocoran dan efisiensi pada *fuel cell* pada module UniTrain-I. *Fuel cell* merupakan salah satu teknologi energi terbarukan yang mengubah energi kimia dari gas Hidrogen (H₂) menjadi energi listrik dan panas dengan produk sampingan berupa air. Penelitian dilakukan di Laboratorium Energi Terbarukan Politeknik Negeri Sriwijaya menggunakan perangkat praktikum UniTrain-I dari Lucas Nulle. Pengujian awal menunjukkan adanya kebocoran pada module, yang menyebabkan penurunan efisiensi. Melalui serangkaian pengujian, termasuk produksi gas H₂ menggunakan elektrolyzer dan pengukuran tingkat kebocoran, ditemukan dua titik kebocoran utama yaitu pada sambungan tutup atas tabung penyimpanan dan selang pembuangan. Setelah dilakukan perbaikan pada titik kebocoran tersebut, hasil pengujian ulang menunjukkan tingkat kebocoran berhasil dikurangi sesuai standar, dari 1,86 ml/menit menjadi 1 ml/menit, dan efisiensi *fuel cell* meningkat signifikan dari 30,8% menjadi 56,1%. Kebocoran pada *fuel cell* sangat berpengaruh terhadap efisiensi sehingga perlu diperhatikan. Penelitian ini memberikan rekomendasi perbaikan untuk mengatasi kebocoran dan meningkatkan kinerja *fuel cell*, yang diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan teknologi energi terbarukan yang lebih efisien dan andal.

Kata kunci—Fuel Cell, Electrolyzer, Energi Terbarukan, Kebocoran Hidrogen, PEMFC, UniTrain-I,

Abstract— *This study examines the leakage rate and efficiency of fuel cells in the UniTrain-I module. Fuel cell is one of the renewable energy technologies that converts chemical energy from Hydrogen gas (H₂) into electrical energy and heat with by-products in the form of water. The research was conducted at the Renewable Energy Laboratory of Politeknik Negeri Sriwijaya, using UniTrain-I practicum device from Lucas Nulle. Initial testing showed a leak in the module, leading to a decrease in efficiency. Through a series of tests, including the production of H₂ gas using electrolyzers and measurement of leak levels, two main leak points were found, namely at the top cap connection of the storage tube and the drain hose. After repairs were made to the leak point, the results of retesting showed that the leak rate was successfully reduced according to the standard, from 1.86 ml / minute to 1 ml / minute, and the efficiency of the fuel cell increased significantly from 30.8% to 56.1%. Leakage in fuel cells is very influential on efficiency so it needs to be considered. This research provides recommendations for improvements to overcome leaks and improve fuel cell performance, which is expected to contribute to the development of more efficient and reliable renewable energy technologies.*

Keywords— Fuel Cell, Electrolyzer, Renewable Energy, Hydrogen leakage, PEMFC, UniTrain-I

I. PENDAHULUAN

Energi Terbarukan telah menjadi subjek penelitian yang signifikan dalam beberapa dekade terakhir sebagai salah satu teknologi utama dalam upaya mengurangi ketergantungan global terhadap bahan bakar fosil dan mengatasi masalah emisi gas rumah kaca (Mohsin et al., 2020). Pengembangan energi terbarukan menjanjikan potensi besar dalam menghasilkan energi bersih dengan efisiensi tinggi, tanpa menghasilkan polusi udara yang merugikan lingkungan (Volta et al., 2021). Salah satu energi terbarukan yang saat ini sedang dikembangkan adalah *fuel cell*.

Fuel cell bekerja dengan mengonversi energi kimia langsung dari gas H₂ menjadi energi listrik dan panas, dengan air sebagai produk sampingan (Babatunde et al., 2020). Namun, seperti teknologi lainnya, *fuel cell* tidak terlepas dari tantangan dan kendala. Salah satu masalah yang sering dihadapi adalah

kebocoran, yang dapat mengakibatkan berbagai dampak negatif seperti penurunan efisiensi, kerusakan peralatan, dan bahaya lingkungan (Fan et al., 2022). Penurunan efisiensi berpengaruh sangat berpengaruh dalam optimalisasi perkembangan *fuel cell*.

Menurut (Sadat et al., 2014) dalam penelitiannya menyatakan penurunan tegangan yang dihasilkan disebabkan oleh penurunan tekanan gas oksigen dan hidrogen dalam proses *fuel cell*. Penurunan tekanan ini terjadi karena adanya kebocoran pada saat proses suplai oksigen dan hidrogen ke anoda dan katoda. Penurunan efisiensi juga berpengaruh pada saat proses distribusi gas hidrogen setelah proses elektrolisis ke unit *fuel cell* karena kebocoran yang terjadi selama proses distribusi (Tsakiris, 2024). Selain kebocoran, penurunan tegangan dan arus yang dihasilkan juga dipengaruhi oleh temperatur (Ozigi et al., 2023). Temperatur secara signifikan mempengaruhi kurva I-V dan harus dipertimbangkan selama

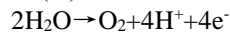
Diterima: 3 Juni 2024 | Disetujui: 25 Juni 2024 | Dipublikasi: 2 Juli 2024

desain sel bahan bakar Hidrogen. Proses yang dilakukan secara kontinyu jika tidak dilakukan proses pendinginan yang mendukung maka akan menghasilkan temperatur yang tinggi

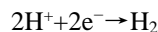
Fuel cell generator UniTrain-I dari Lucas Nulle yang berada di Laboratorium Energi Terbarukan Politeknik Negeri Sriwijaya memiliki masalah pada saat pengujian efisiensi. Efisiensi yang dihasilkan lebih rendah dari standar module. Berdasarkan literatur, kemungkinan penurunan efisiensi diakibatkan adanya kebocoran pada sistem dan temperatur yang tinggi. Untuk temperatur tidak dilakukan pengujian karena sistem pendinginan sudah sesuai, sehingga penelitian ini difokuskan pada pengujian tingkat kebocoran pada *fuel cell* dan mencari penyebabnya kebocoran tersebut guna dilakukannya perbaikan sehingga peralatan tersebut bisa kembali mencapai tingkat efisiensi sesuai dengan standar. Pengujian aspek-aspek penting terkait kebocoran dalam *fuel cell* dilakukan untuk mengidentifikasinya, serta pendekatan pencegahan dan penanganan yang dapat diterapkan untuk meminimalkan risiko dan meningkatkan kinerja *fuel cell* secara keseluruhan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

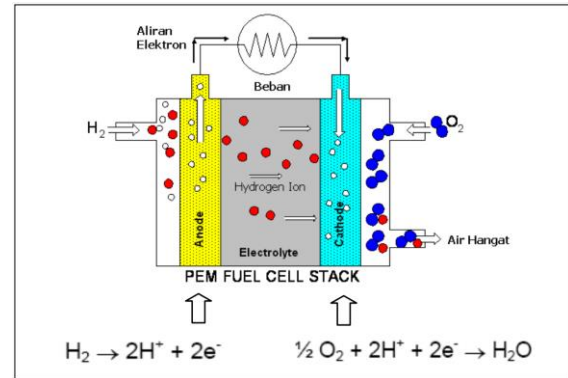
Fuel cell suatu perangkat elektrokimia yang secara kontinu mengkonversikan energi kimia menjadi energi (O'Hayre et al., 2016). *Fuel cell* bekerja berdasarkan prinsip pembakaran listrik-kimiawi. Bahan bakar pada *fuel cell* berupa gas H₂ diproduksi oleh *electrolyzer*. *Elektrolyzer* adalah perangkat yang digunakan untuk memisahkan air (H₂O) menjadi hidrogen (H₂) dan oksigen (O₂) melalui proses elektrolisis (Amores et al., 2020). Arus listrik diterapkan melalui dua elektroda yang terendam dalam air. Elektroda positif disebut anoda, dan elektroda negatif disebut katoda (Salam et al., 2023). Pada anoda, air mengalami oksidasi, menghasilkan oksigen gas (O₂), proton (H⁺), dan elektron (e⁻). Reaksi kimia yang terjadi adalah:



Proton (H⁺) yang dihasilkan di anoda bergerak melalui membran elektrolit menuju katoda, sementara elektron mengalir melalui sirkuit eksternal ke katoda. Di katoda, proton dan elektron bereaksi untuk membentuk hidrogen gas (H₂). Reaksi yang terjadi adalah:



Gas H₂ yang sudah terbentuk selanjutnya dimanfaatkan sebagai bahan bakar pada *fuel cell*. Ada beberapa jenis *fuel cell* dan yang digunakan pada module UniTrain-I *fuel cell* ini adalah berjenis *Proton Exchange Membrane* (PEM). *Fuel cell* jenis PEM terdiri dari dua buah elektroda, anoda dan katoda. Keduanya dipisahkan oleh *Polymer Electrolyte Membrane* (PEM). Setiap elektroda dilapisi dengan platinum-based catalyst. Sebagai bahan bakar digunakan gas hidrogen bertekanan dan dilewatkan ke anoda (-). Sebagai oksidan digunakan oksigen yang diambil dari udara dan dialirkan ke katoda (+) dengan menggunakan kompresor. Akibat adanya katalis platinum, molekul H₂ terpecah menjadi dua proton dan dua elektron. Arus elektron ini dialirkan melalui rangkaian listrik agar menghasilkan arus listrik. Proton akan menembus lapisan membrane, dan bergabung di katode dengan elektron dan oksigen dari udara membentuk air bersih. Dari proses ini dihasilkan panas dan air bersih (Tian et al., 2020).



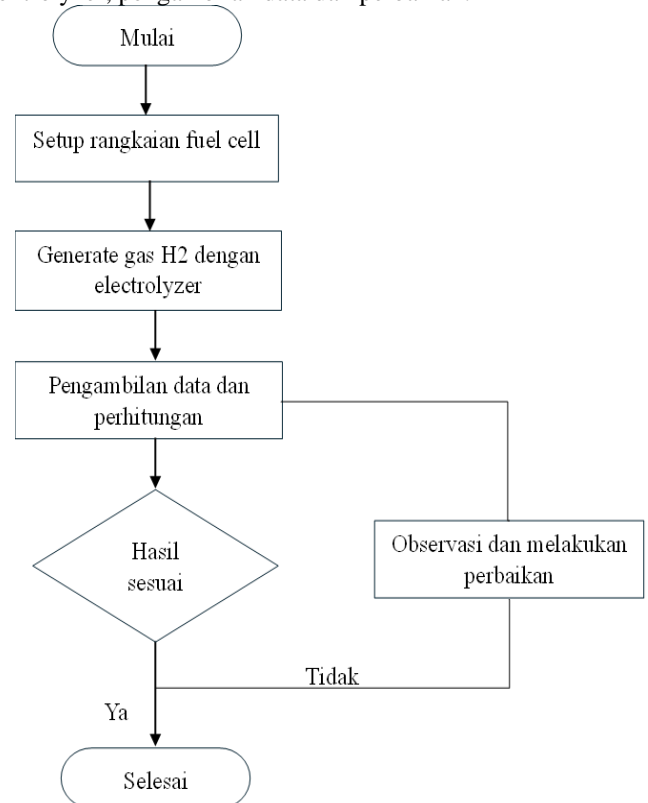
Gambar 1. Prinsip Kerja Fuel Cell PEM

Menurut (Jia et al., 2017) kebocoran dalam *fuel cell* dapat memiliki dampak yang signifikan terhadap efisiensinya. Berikut adalah beberapa pengaruh utama kebocoran terhadap efisiensi *fuel cell*:

- Kehilangan Bahan Bakar
- Penurunan Tekanan
- Kontaminasi Elektrolit
- Overheating
- Kerusakan Struktural

III. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan menjalankan module UniTrain-I *Fuel-cell Technology* dimulai dengan setup rangkaian *fuel cell*, produksi gas H₂ dengan menggunakan *electrolyzer*, pengambilan data dan perbaikan.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

A. Setup Rangkaian Fuel Cell

Pada tahap ini dilakukan setup rangkaian module *fuel cell* sesuai dengan petunjuk yang ada pada bagian *course Fuel-Cell Technology*.

B. Produksi Gas H₂

Tahapan produksi gas H₂ dilakukan dengan langkah kerja sebagai berikut:

- 1) Kosongkan stack, tangki H₂ dan tangki O₂ terlebih dahulu untuk memastikan bahwa hasil pengukuran tidak dapat terdistorsi oleh udara atau uap air.
- 2) Kedua reservoir harus dikosongkan sepenuhnya, dan kolom air harus pada tanda 0 ml. Tutup klem selang jika perlu.
- 3) Buka instrumen virtual *Electrolyzer* melalui menu *Instruments*.
- 4) Biarkan sistem memproduksi gas H₂ hingga level dalam tangki hidrogen mencapai 50 ml.

C. Pengambilan dan Pengolahan Data

Tahap ini dilakukan dengan melakukan pengambilan data dan untuk mengetahui tingkat kebocoran dan efisiensi fuel cell.

- 1) Melanjutkan prosedur sebelumnya, jika tangki H₂ sudah mencapai 50 ml, biarkan sistem diam selama 5 menit.
- 2) Setelah itu, baca level H₂ di tangki dan catat hasilnya
- 3) Selanjutnya kosongkan kembali stack, tangki H₂ dan tangki O₂
- 4) Buka instrumen virtual Voltmeter A dan Ammeter B melalui menu *Instruments*.
- 5) Buka instrumen virtual *Electrolyzer* melalui menu *Instruments*.
- 6) Produksi kembali gas H₂ sampai 60 ml
- 7) Hubungkan rangkaian listrik dengan variabel resistor dan sesuaikan dengan cepat sampai arus mencapai 1000 mA
- 8) Catat nilai arus listrik dan tegangan yang dihasilkan.
- 9) Catat konsumsi H₂ selama 180 detik (3 menit)
- 10) Setelah pengukuran selesai, putus rangkaian listrik dengan variabel resistor
- 11) Kosongkan kembali stack, tangki H₂ dan O₂ dan ulangi pengukuran sampai 3 kali atau didapatkan data yang stabil

Setelah didapatkan data pengukuran selanjutnya dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai dari tingkat kebocoran dan efisiensi pada fuel cell. Untuk tingkat kebocoran digunakan persamaan

$$Lr = \frac{v}{t} \quad (1)$$

Keterangan:

Lr = Leakage Rate (ml/min)

v = Volume H₂ (ml)

t = Waktu (min)

Untuk mendapatkan nilai efisiensi dari fuel cell digunakan persamaan berikut:

$$\eta = \frac{W_{el}}{W_{ch}} = \frac{V.I.t}{HH_2.v} \quad (2)$$

Keterangan:

η = Efisiensi (%)

W_{el} = Energi Listrik

W_{ch} = Energi Kimia

V = Tegangan (volt)

I = Arus (ampere)

t = waktu (dtk)

H_{H2} = Nilai Kalor H₂ (J/ml)

v = Volume Konsumsi H₂ (ml)

Hidrogen mempunyai nilai kalor tetap sebesar 11.92 J/ml

D. Observasi dan Perbaikan

Dalam tahapan ini dilakukan observasi selama proses pengukuran guna mengetahui lokasi kemungkinan kebocoran serta dilakukan perbaikan. Perbaikan dilakukan sampai nilai tingkat kebocoran dan efisiensi sudah sesuai kembali dengan standar module Unitrain-I.

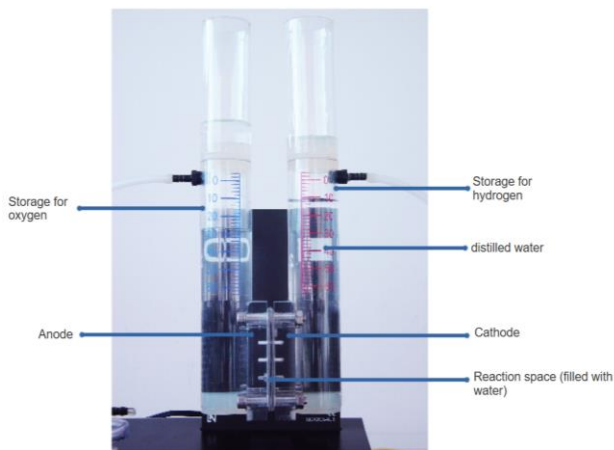
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Energi Terbarukan Politeknik Negeri Sriwijaya. Module Unitrain-I SO4204-4L adalah unit yang digunakan pada penelitian ini dengan papan kode nama *Fuel Cell*.



Gambar 3. Module Unitrain-I SO4204-4L Fuel Cell

Gambar 3 menunjukkan *setup* dari module Unitrain-i SO4204-4L. Module ini terdiri dari beberapa bagian yaitu *electrolyzer*, *fuel cell stack*, dan panel koneksi. Panel koneksi digunakan untuk menghubungkan sensor alat ukur dengan instrumen alat ukur virtual. Gas H₂ diproduksi melalui proses elektrolisis dimana pada proses ini dilakukan dengan mengubah air (H₂O) menjadi gas H₂ dan O₂. Arus listrik dialirkan melalui air yang selanjutnya terurai menjadi ion hidrogen (H⁺) dan hidroksida (OH⁻). Pada katoda (elektroda negatif), ion H⁺ menerima elektron dan berubah menjadi gas hidrogen. Di anoda (elektroda positif), ion OH⁻ melepaskan elektron dan menjadi gas oksigen. Gas H₂ dan O₂ yang sudah terbentuk akan tersimpan kedalam tabung penyimpanan dan air yang ada pada tabung akan mengalir ke bagian atas tabung.



Gambar 4. *Electrolyzer* dan Tabung penyimpanan gas H₂ dan O₂

Gambar 4 menunjukkan gambar dan bagian dari *electrolyzer* dan tabung penyimpanan gas H₂ dan O₂. Arus listrik dialirkan melalui *electrolyzer virtual instrument* dengan mengklik tombol power dan mengatur besar arus yang dialirkan maksimal 2A. Semakin besar arus yang dialirkan makan semakin cepat gas H₂ akan terproduksi. Gas yang dihasilkan akan mengisi tabung penyimpanan dan air (H₂O) yang tidak terkonversi akan terangkat ke bagian atas tabung. Gas H₂ dan O₂ yang sudah diproduksi nantinya akan dalirkan ke *stack fuel cell* sehingga menghasilkan listrik. Gas H₂ dan O₂ yang sudah bereaksi di *stack* akan kembali membentuk H₂O dan masuk ke tabung penyimpanan. Produksi gas H₂ dihentikan setelah mencapai 50 ml dengan memutus arus yang mengalir melalui instrumen virtual. Setelah didiamkan selama 5 menit kemudian dicatat gas H₂ yang berkurang. Berikut hasil yang didapat setelah 3 kali pengambilan data.

TABEL I. VOLUME H₂ SETELAH DIDIAMKAN

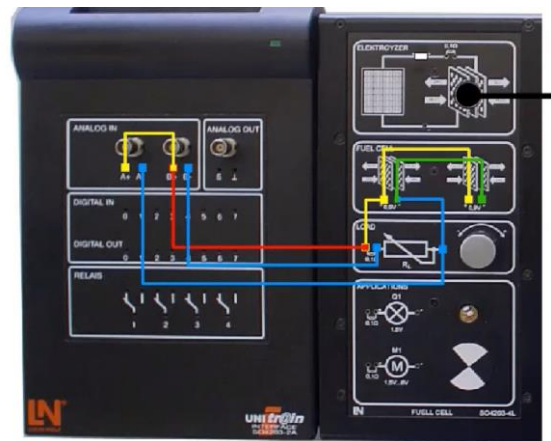
Percobaan ke	Volume H ₂ (ml)	Waktu (menit)
1	10	
2	9	5
3	9	

Berdasarkan data pada tabel 1 diketahui bahwa gas H₂ berkurang tanpa diberikan beban. Ini menunjukkan bahwa adanya kebocoran pada module Unitrain-I SO4204-4L. Untuk mengetahui tingkat kebocoran dihitung dengan menggunakan persamaan 1 sehingga diperoleh hasil perhitungan matematis dalam tabel II.

TABEL II. TINGKAT KEBOCORAN H₂

Percobaan ke	Tingkat Kebocoran (ml/menit)
1	2
2	1.8
3	1.8
Rata-rata	1.86

Setelah didapatkan data tingkat kebocoran selanjutnya dilakukan pengambilan data untuk mengetahui tingkat efisiensi dari *fuel cell*. Module Unitrain-I SO4204-4L dihubungkan dengan *Interface* SO4203-2A untuk mengukur Arus dan tegangan yang dihasilkan seperti pada gambar 5.



Gambar 5. Rangkaian Interface dan module fuel cell

Pada pengujian ini dilakukan pengukuran nilai arus dan tegangan yang dihasilkan oleh *fuel cell* yang merupakan hasil konversi gas dari H₂. Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali guna mendapatkan hasil yang optimal. Hasil pengujian bisa dilihat pada tabel 3.

TABEL III. HASIL PENGUKURAN KONSUMSI H₂

Percobaan ke	Tegangan (V)	Arus (A)	Volume H ₂ (ml)	Waktu (detik)
1	0.46	1	28	
2	0.43	1	27	180
3	0.44	1	27	
Rata-rata	0.44	1	27.3	

Dari hasil pengujian pada tabel III, dapat dilihat bahwa gas H₂ yang sudah diproduksi sebelumnya berhasil dikonversi menjadi energi listrik dengan adanya tegangan dan arus yang terbaca pada virtual instrumen. Pada pengujian tingkat kebocoran selumnya diketahui bahwa ada kebocoran pada saat sistem dalam kondisi diam (*idle*) maka volume gas H₂ yang dikonversi perlu dilakukan pengurangan terhadap gas H₂ yang bocor. Perhitungan menggunakan persamaan 3.

$$V_{H_2} = V_{total} - (Lr \times t) \quad (3)$$

V_{H_2} = Volume H₂ terkonversi(ml)

V_{total} = Volume total (ml)

Lr = Leakage rate (ml/menit)

T = waktu (menit)

TABEL IV. VOLUME H₂ YANG TERKONVERSI

Percobaan ke	Volume H ₂ Total (ml)	Leakage Rate (ml/menit)	Volume H ₂ Terkonversi (ml)
1	28	2	22
2	27	1.8	21.6
3	27	1.8	21.6
Rata-rata	27.3	1.9	21.7

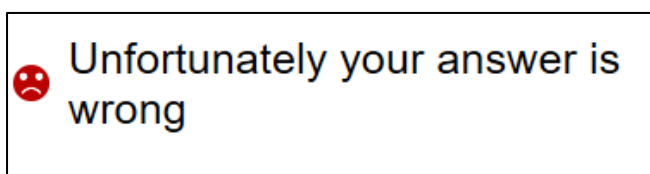
Untuk mengetahui efisiensi dari *fuel cell* maka dilakukan perhitungan menggunakan persamaan 2 dimana energi listrik yang dihasilkan (*output*) dibagi dengan energi kimia (*input*). Gas H₂ memiliki nilai kalor sebesar 11920 kJ/m³. Karena satuan pada alat ukur dalam mililiter maka nilai kalor H₂ di

konversi menjadi 11.92 J/ml. Hasil perhitungan efisiensi bisa dilihat pada tabel V.

TABEL V. TINGKAT KEBOCORAN H₂

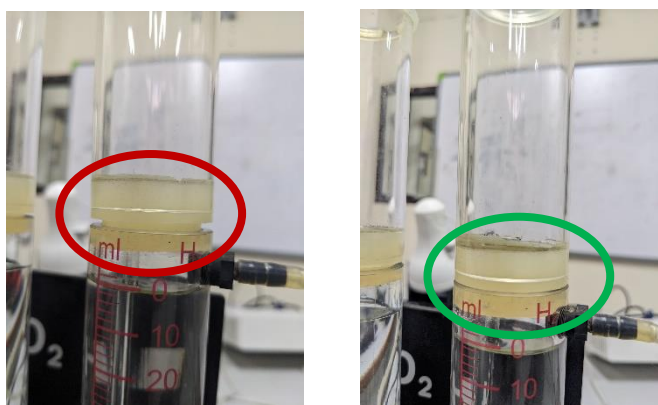
Percobaan ke	Effisiensi (%)
1	31.6
2	30.1
3	30.8
Rata-rata	30.8

Berdasarkan panduan module, standar tingkat kebocoran gas H₂ dalam keadaan diam sebesar 1 ml/menit dan pada hasil pengujian tingkat kebocoran rata-rata 1.86 ml/menit sehingga berdampak pada efisiensi dari fuel cell. Data-data yang dihasilkan kemudian dimasukkan kedalam *Fuel Cell Technology Course* namun semua mendapat notifikasi nilai yang salah yang bisa dilihat pada gambar 6. Notifikasi tersebut menunjukkan bahwa data yang dihasilkan oleh module UniTrain-I Fuel tidak sesuai dan terindikasi mengalami kebocoran sehingga perlu dilakukan perbaikan.



Gambar 6. Notifikasi pada *Fuel Cell Technology Course*

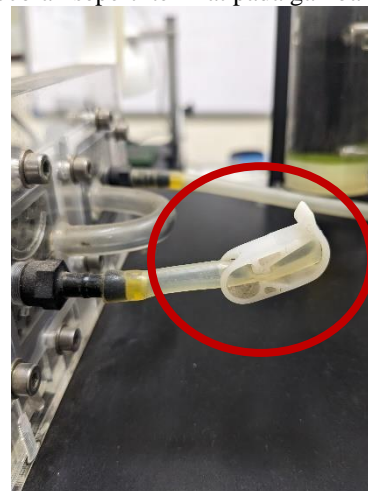
Selama proses pengujian dilakukan pengecekan terhadap module untuk mengetahui titik kebocoran. Pengecekan dilakukan pada titik-titik yang memiliki kemungkinan terjadinya kebocoran. Dari hasil pengecekan diketahui ada 2 titik kemungkinan kebocoran yaitu pada bagian sambungan tutup atas tabung penyimpanan dan pada bagian selang pembuangan. Pada sambungan tersebut terlihat tidak rapat dan ada jarak sekitar 2 mm. Setelah dilakukan pengecekan tutup ini bisa dirapatkan kembali tanpa harus membongkar bagian-bagian module yang lain.



Gambar 7. Kondisi sebelum dan sesudah perbaikan sambungan tutup atas

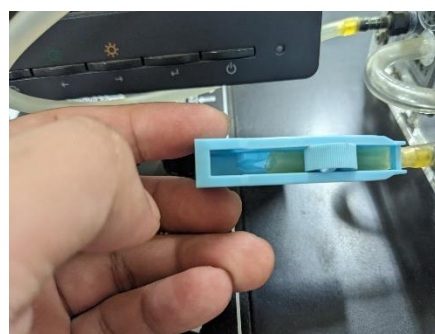
Selanjutnya dilakukan perbaikan pada bagian selang pembuangan. Selang pembuangan ini berfungsi untuk mengosongkan dan membuang gas sisa pada tabung penyimpanan, *electrolyzer* dan *stack fuel cell*. Pada selang ini terdapat penjepit yang berfungsi untuk membuka dan menutup aliran pada selang secara manual. Saat dilakukan pengecekan

diketahui bahwa penjepit sudah tidak kencang sehingga terjadinya kebocoran seperti terlihat pada gambar 8.



Gambar 8. Kondisi penjepit selang pembuangan sudah tidak kencang

Melihat kondisi penjepit selang ini, diperkirakan inilah penyebab utama kebocoran pada *fuel cell*. Untuk memastikan hal ini dilakukan pengujian secara fisik dan visual yaitu dengan mendekatkan kertas tisu pada ujung pembuangan selang saat kondisi penjepit tertutup dan volume gas H₂ sebesar 60 ml. Hasil pengujian didapatkan kertas tisu terlihat bergerak karena ada hembusan udara dari ujung pembuangan selang. Perbaikan yang dilakukan pada bagian ini dengan cara mengganti penjepit dengan yang baru dan lebih rapat. Setelah dipasang penjepit baru kemudian dilakukan pengujian lagi secara fisik dan visual, hasilnya menunjukkan bahwa tidak ada lagi pergerakan tisu oleh hembusan udara dari dalam selang pembuangan. Penjepit baru yang dipasang bisa dilihat pada gambar 9.



Gambar 9. Kondisi penjepit selang pengganti

Setelah dilakukan perbaikan pada semua titik kebocoran, selanjutnya dilakukan pengujian kembali. Pengujian dimulai dari produksi gas H₂ pada *electrolyzer*, pengujian tingkat kebocoran serta menghitung efisiensi. Hasil pengujian tingkat kebocoran dapat dilihat pada tabel VI dan tabel VII.

TABEL VI. VOLUME H₂ SETELAH DIDIAMKAN

Percobaan ke	Volume H ₂ (ml)	Waktu (menit)
1	5	
2	5	5
3	5	

TABEL VII. TINGKAT KEBOCORAN H₂

Percobaan ke	Tingkat Kebocoran (ml/menit)
1	1
2	1
3	1
Rata-rata	1

Pada tabel bisa dilihat bahwa hasil tingkat kebocoran sebesar 1 ml/menit. Ini sudah sesuai dengan standar pada pedoman module. Selanjutnya dilakukan pengujian dilanjutkan untuk mengetahui apakah ada pengaruh dari perbaikan yang dilakukan terhadap peningkatan efisiensi *fuel cell*. Hasil dari pengujian tersaji pada tabel VIII, IX, dan X berikut.

TABEL VIII. HASIL PENGUKURAN KONSUMSI H₂

Percobaan ke	Tegangan (V)	Arus (A)	Volume H ₂ (ml)	Waktu (detik)
1	0.65	1	20	180
2	0.64	1	21	
3	0.64	1	20	
Rata-rata	0.44	1	20.3	

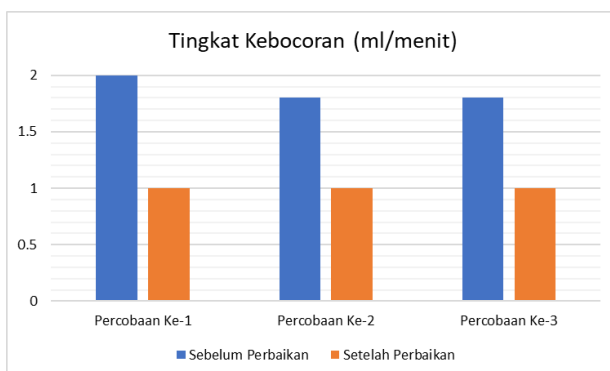
TABEL IX. VOLUME H₂ YANG TERKONVERSI

Percobaan ke	Volume H ₂ Total (ml)	Leakage Rate (ml/menit)	Volume H ₂ Terkonversi (ml)
1	20	1	17
2	21	1	18
3	21	1	17
Rata-rata	20.3	1	17.3

TABEL X. TINGKAT KEBOCORAN H₂

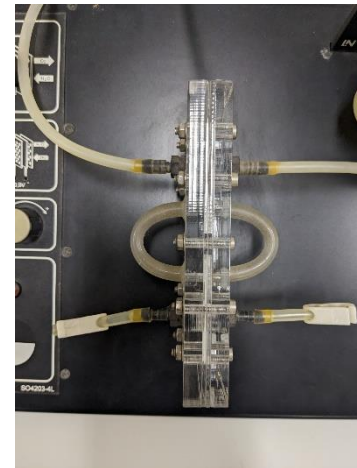
Percobaan ke	Effisiensi (%)
1	57.7
2	53.7
3	56.8
Rata-rata	56.1

Kebocoran pada module sangat berpengaruh pada efisiensi *fuel cell*. Berdasarkan hasil pengujian terlihat perbaikan yang dilakukan untuk mengatasi kebocoran pada module *fuel cell* sangat berpengaruh terhadap efisiensi. Grafik perbandingan tingkat kebocoran fuel cell bisa dilihat pada gambar 10.



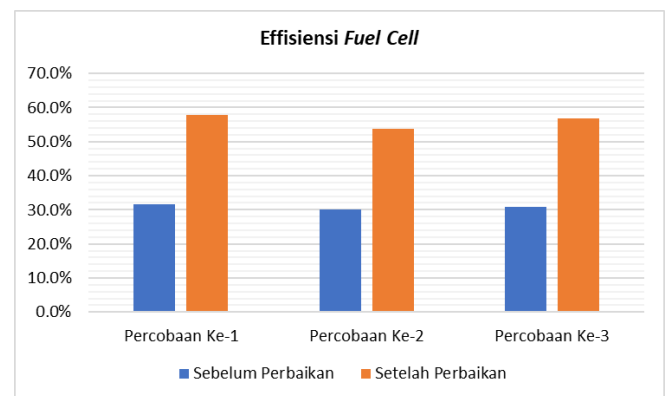
Gambar 10. Grafik perbandingan Tingkat kebocoran

Pada pedoman module diketahui standar untuk tingkat kebocoran sebesar 1 ml/menit. Setelah perbaikan dilakukan seharusnya tidak ada kebocoran. Hasil analisa menunjukkan bahwa kemungkinan kebocoran yang masih terjadi berasal dari stack *fuel cell* seperti pada gambar 11. Pada stack ini terjadi konversi gas H₂ menjadi listrik. Perbaikan tidak dilakukan pada stack karena untuk tingkat kebocoran termasuk dalam salah satu *jobsheet* praktikum pada module *fuel cell* ini.



Gambar 11. Stack Fuel Cell

Effisiensi fuel meningkat setelah dilakukan perbaikan. Grafik perbandingan efisiensi sebelum dan setelah perbandingan bisa dilihat pada gambar 12. Pada grafik tersebut rata-rata efisiensi meningkat dari 30.8% menjadi 56.1%. Peningkatan ini dipengaruhi oleh volume gas H₂ pada *fuel cell* yang terkonversi menjadi listrik. Penurunan jumlah konsumsi gas H₂ dari 27.3 ml menjadi 20.3 ml salah satu faktor yang mempengaruhi peningkatan efisiensi karena H₂ yang terbuang karena kebocoran bisa diatasi setelah perbaikan.



Gambar 12. Grafik perbandingan efisiensi

Data-data yang dihasilkan kemudian dimasukkan kedalam *Fuel Cell Technology Course* dan hasilnya semua mendapat notifikasi nilai yang dimasukkan sudah benar sehingga perbaikan yang dilakukan untuk mengatasi tingkat kebocoran pada fuel cell sudah berhasil dilakukan. Selanjutnya perlu dilakukan pengecekan titik kebocoran yang sudah diuji sebelum menggunakan module.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi dan memperbaiki masalah kebocoran pada modul *fuel cell* UniTrain-I di Laboratorium Energi Terbarukan Politeknik Negeri Sriwijaya. Hasil pengujian awal menunjukkan adanya kebocoran yang signifikan pada sambungan tutup atas tabung penyimpanan dan selang pembuangan, yang menyebabkan penurunan efisiensi *fuel cell*. Setelah perbaikan dilakukan pada kedua titik kebocoran tersebut, tingkat kebocoran berkurang menjadi sesuai dengan standar yang ditetapkan, yaitu 1 ml/menit. Efisiensi *fuel cell* meningkat dari 30,8% menjadi 56,1% setelah perbaikan, menunjukkan bahwa kebocoran gas H₂ adalah faktor utama yang mempengaruhi kinerja *fuel cell*. Pemeliharaan dan perbaikan rutin pada komponen-komponen kritis *fuel cell* sangat penting untuk menjaga kinerja optimal dan efisiensi. Temuan ini diharapkan dapat membantu pengembangan lebih lanjut teknologi *fuel cell* yang lebih efisien dan andal, serta memberikan kontribusi positif dalam upaya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengatasi masalah emisi gas rumah kaca.

REFERENSI

- Amores, E., Sánchez, M., Rojas, N., & Sánchez-Molina, M. (2020). Renewable hydrogen production by water electrolysis. *Sustainable Fuel Technologies Handbook*, 271–313. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822989-7.00010-X>
- Babatunde, O. M., Munda, J. L., & Hamam, Y. (2020). A Comprehensive State-of-the-Art Survey on Hybrid Renewable Energy System Operations and Planning. *IEEE Access*, 8, 75313–75346. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988397>
- Fan, Z., Sheerazi, H., Bhardwaj, A., Corbeau, A.-S., Longobardi, K., Castañeda, A., Merz, A.-K., Caleb, D. R., Woodall, M., Agrawal, M., & Orozco-Sanchez, S. (2022). *Hydrogen Leakage: A Potential Risk For The Hydrogen Economy*. <https://energypolicy.columbia.edu/about/partners>
- Jia, C., Han, M., & Chen, M. (2017). Analysis of Gas Leakage and Current Loss of Solid Oxide Fuel Cells by Screen Printing. *ECS Transactions*, 78(1), 1533–1540. <https://doi.org/10.1149/07801.1533ecst>
- Mohsin, I., Al-Attas, T. A., Sumon, K. Z., Bergerson, J., McCoy, S., & Kibria, M. G. (2020). Economic and Environmental Assessment of Integrated Carbon Capture and Utilization. *Cell Reports Physical Science*, 1(7), 100104. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100104>
- O’Hayre, R., Cha, S., Colella, W., & Prinz, F. B. (2016). *Fuel Cell Fundamentals*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119191766>
- Ozigi, B. O., Odiya, O. O., & Amiebenomo, S. O. (2023). Efficiency Analysis of Hydrogen Fuel Cell Power Systems for Off-Grid Applications. *International Journal of Engineering and Advanced Technology Studies*, 11(1), 37–54. <https://doi.org/10.37745/ijeats.13/vol11n13754>
- Sadat, A., & Sadat, M. N. (2014). *Fuel Cell Efficiency, Voltage Analysis And Performance Optimization*. <http://www.novapdf.com>
- Salam, M. A., Ahmed, K., Marufuzzaman, & Muhammad Sayem, A. S. (2023). Techno-economic prospects of green hydrogen production. *Hydrogen Energy Conversion and Management*, 133–155. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15329-7.00006-5>
- Tian, Y., Zou, Q., & Lin, Z. (2020). Hydrogen Leakage Diagnosis for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems: Methods and Suggestions on Its Application in Fuel Cell Vehicles. *IEEE Access*, 8, 224895–224910. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3044362>
- Tsakiris, A. (2024). General rights Analysis of hydrogen fuel cell and battery efficiency Analysis of hydrogen fuel cell and battery efficiency. In *Downloaded from orbit.dtu.dk on*. <http://www.energyefficiencycentre.org>
- Volta, Y. A., Rusdianasari, & Yusi, S. (2021). *Life Cycle Assessment (LCA) in Pulp & Paper Mills: Comparison Between MFO With Biomass in Lime Kiln*. <https://doi.org/10.2991/ahe.k.210205.054>