

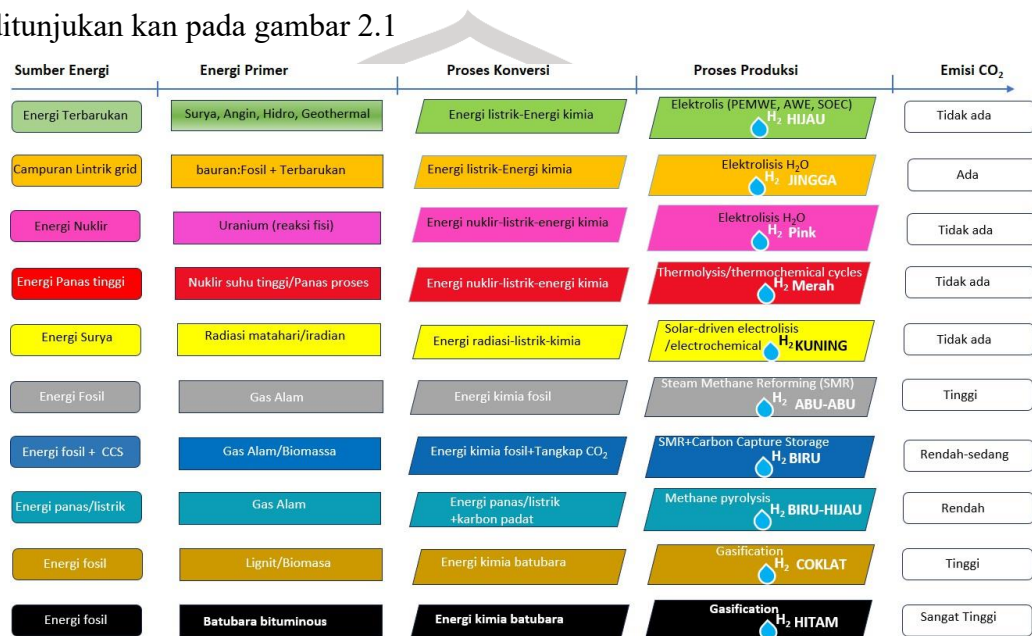
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Model Produksi Hidrogen Hijau Metode PEMWE Memanfaatkan Energi Sinar Surya

Proses produksi hidrogen hijau dengan metode PEMWE yaitu dengan memisahkan hidrogen dan oksigen dalam air melalui proses elektrokimia. Energi listrik dialirkan ke dalam system sebagai pemicu reaksi oksidasi pada anode dengan melepaskan ion H^+ dan O_2 selanjutnya ion H^+ menuju katode melalui PEM sehingga dihasilkan hydrogen murni (Waribam et al. 2023). Hidrogen dapat diproduksi dari berbagai teknik pemerosesan dengan memanfaatkan sumber energi yang berbeda diantaranya produksi hidrogen berbasis batubara, gas alam dan elektrolisis air. Hidrogen hijau standard disepakati secara global apabila hidrogen diproduksi berbasis dari energi terbarukan atau mencapai ambang batas emisi sebesar $36,4 \text{ gCO}_2\text{eq/MjH}_2$ ($4,37 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgH}_2$) (Liu et al., 2021). Sebagai pengembangan dari konsep produksi hidrogen hijau berbagai literatur mengelompokan teknologi produksi hidrogen ke dalam klasifikasi berbasis warna (*hydrogen color classification*) yang merepresentasikan sumber energi primer, jalur proses konversi energi, serta intensitas emisi karbon yang dihasilkan (Valverde et al. 2023). Dalam klasifikasi ini hidrogen hijau dihasilkan melalui elektrolisa air, termasuk teknologi PEMWE yang didukung oleh energi terbarukan seperti surya, angin, atau hidro, sehingga tidak menghasilkan emisi CO_2 langsung dan memenuhi ambang batas emisi rendah yang disepakati secara global. Sebaliknya hidrogen abu-abu (*Grey hydrogen*) dan hidrogen coklat atau hitam (*brown/black hydrogen*) diproduksi dari gas alam dan batubara melalui proses steam methane reforming atau gasification, yang melibatkan konversi energi kimia fosil menjadi hidrogen dengan intensitas emisi karbon tinggi. Hidrogen biru (*blue hydrogen*) dikembangkan sebagai solusi transisi dengan memanfaatkan bahan bakar fosil yang dilombinasikan dengan teknologi *Carbon Capture and Storage* (CCS) untuk

menurunkan CO₂, sementara hidrogen pink dan merah (pink/red hydrogen) memanfaatkan energi nuklir dalam bentuk listrik atau panas suhu tinggi untuk menggerakkan proses elektrolisa atau termokimia. Pendekatan klasifikasi berbasis warn ini berfungsi sebagai kerangka konseptual bertujuan menghubungkan jenis energi primer, sumber hidrogen, mekanisme konversi energi, serta tingkat emisi CO₂ ditunjukan kan pada gambar 2.1



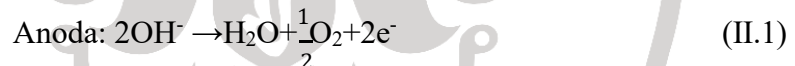
Gambar 2. 1 Klasifikasi hidrogen berdasarkan warna, energi primer, dan proses konversi

Hidrogen hijau proses elektrolisa air menggunakan teknologi membrane penukar proton (PEMWE) memiliki banyak keunggulan dari proses metode lainnya seperti *Alkaline*, *Solid Oxid*, *Anion Exchange*, *Acidic-Alkaline Amphotoric*, *Microbial* dan *Photoelectrochemical*. Keunggulan PEMWE diantaranya: waktu respon cepat, ruang proses kecil, mampu mencapai kerapatan arus tinggi diatas 2 A/cm², Faradaic efisiensi tinggi, mampu beroperasi pada tekanan diferensial secara aman dan cukup menggunakan air mineral (Zhang et al. 2022). Keunggulan PEMWE ini didukung oleh sumber energi sinar surya akan lebih meningkatkan efisiensi lebih tinggi dan sangat berdampak pada pengurangan gas emisi CO₂ lebih

tinggi juga. Pengurangan gas emisi CO₂ ini dapat dilihat dengan pendekatan pada kendaraan berbasis FCEV dan pembangkit listrik berbasis bahan bakar diesel tiap liternya (0,73 kg) setara dengan pelepasan CO₂ sebesar 2,6 kg setelah proses pembakaran (Wendeker et al. 2022). Sumber energi hidrogen hijau dengan metode PEMWE dan PLTS dalam penelitian ini akan berpotensi besar mengurangi emisi gas CO₂. Saat ini produksi hidrogen metode elektrolisa dikembangkan menggunakan beberapa teknologi yang berbeda, teknologi PEMWE dan AE sudah memasuki tahap komersial selebihnya masih dikembangkan dalam skala lab/riset.

Teknologi elektrolisa yang dikembangkan berikut dengan kekuatan dan keterbatasannya antara lain (Ahmad Kamaroddin et al. 2021) dan (Qiu et al.2025):

1. Elektrolisa Alkaline (*Liquid Alkaline Water Electrolysis-AWE*): Menggunakan larutan basa (KOH dan NaOH) sebagai elektrolit cair. Produksi hidrogen AWE sudah dikembangkan secara komersial karena memiliki nilai keekonomian dan beroperasi tahan lama, namun memiliki kekurangan yang masih perlu ditingkatkan antara lain: tingkat kemurnian hidrogen rendah, kerapatan arus terbatas (<400 mA/cm²) dan efisiensi energi rendah. Reaksi AE ditunjukkan pada persamaan 1, 2 dan 3:



Kekuatan:

Tidak membutuhkan katalis logam mulia sehingga biaya lebih rendah

Keterbatasan:

- a) Resistensi area specifk tinggi karena jarak antar elektroda relatif besar dan diaphragm tebal, membatasi desitas arus operasional (200-400mA/cm²)
- b) Elektrorit cair besifat korosif (larutan basa pekat), butuh managemen material dan pemeliharaan yang baik

- c) Produksi H₂ per unit area relatif rendah dibandingkan teknologi membran modern

2. Elektrolisa air *Proton Exchange Membrane* (PEMWE): Menggunakan membran polimer yang menghantarkan ion proton (H⁺) dari anoda ke katoda, teknik pemisahan oksigen dan hydrogen dari air berkembang dengan baik karena memiliki kemampuan beroperasi pada tingkat kerapatan arus tinggi pada tegangan tinggi, kemurnian hidrogen 99,995% dan lebih aman. Reaksi PEMWE ditunjukkan pada persamaan 4,5 dan 6:



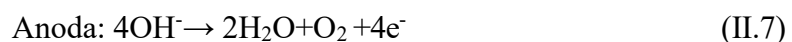
Kekuatan:

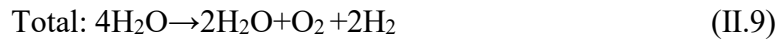
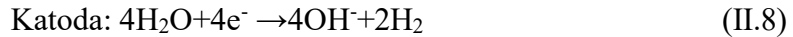
- Densitas arus tinggi (> 1 A/cm²), produksi H₂ per area sel relatif besar
- Efisiensi energi tinggi (konversi listrik ke H₂ relatif baik), kemurnian gas tinggi (> 99,9%) karena membran efektif mengisolasi gas
- Respon cepat terhadap variasi input listrik

Keterbatasan:

Biaya relatif tinggi karena menggunakan katalis Ir-Iridium, Pt-Platinum

3. Elektrolisa *Anion Exchange Membrane* (AEM) : menggunakan membran polimer yang menghantarkan ion hidroksida (OH⁻), menggunakan kombinasi air dari penyulingan atau larutan *alkaline* ringan untuk memproduksi hidrogen. Daya hantar ion AEM rendah, efisiensi arus listrik rendah, membrane kurang stabil yang menimbulkan ohm resistansi besar. Reaksi AEM ditunjukkan pada persamaan 7,8 dan 9:





Kekuatan:

Tidak menggunakan elektrolit cair pekat, resiko korosi dan penanganan cairan keras bisa berkurang dibanding AWE

Keterbatasan:

Membran masih memiliki tantangan besar terkait konduktifitas ionik dan stabilitas jangka panjang/daya tahan. AEM menunjukkan degradasi dalam waktu < 1000 jam pada kondisi operasional

4. Elektrolisa *Solid Oxide* (SOE): beroperasi pada suhu tinggi 500-1000 °C agar dapat menghantarkan ion tinggi. Reaksi SOE ditunjukkan pada persamaan 10, 11 dan 12:



Kekuatan:

Efisiensi listrik ke H₂ sangat tinggi, jauh lebih baik dibandingkan Alkali, PEMWE dan AEM

Keterbatasan:

- a) Teknologi masih dalam tahap berkembang/pilot
- b) Kompleksitas system tinggi: membutuhkan manajemen termal, suplai uap air, sealing hermetic yang ketat, isolasi panas, kontrol gas dan tekanan

5. Elektrolisa *Sel Mikrobial* (MEC): Memamfaatkan mikroorganisme pada anoda yang mengoksidasi bahan organik, hidrogen diproduksi dengan menggunakan

bahan organik seperti air limbah atau limbah industri biomasa. Prinsip kerja MEC energi arus listrik ditransformasikan menjadi energi kimia. Reaksi MEC ditunjukkan pada persamaan 13, 14 dan 15:



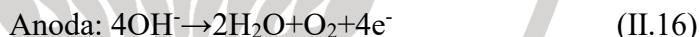
Kekuatan:

Dapat memanfaatkan limbah organik atau air limbah untuk memproduksi H₂ (waste to hydrogen)

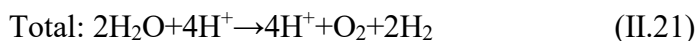
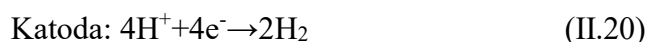
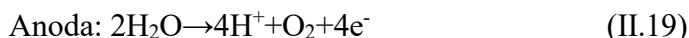
Keterbatasan:

Produktivitas (yield dan densitas H₂) relatif rendah dibanding teknologi elektrolisis konvensional, terbatas oleh laju metabolisme mikroba, transport masa

6. Elektrolisa *Acid Alkaline Amphoteric* (AAA): hidrogen diproduksi dengan menggunakan bahan sulphuric acid (H₂SO₄) dan potassium hydroxide (KOH) pada suhu operasi 20-60 °C. Reaksi AAA ditunjukkan pada persamaan 16, 17 dan 18:



7. Elektrolisa Photoelectrochemical (PEC): Sinar surya diserap oleh material semikonduktor menjadi energi untuk memisahkan hidrogen dan oksigen dari air. Reaksi PEC ditunjukkan pada persamaan 19, 20 dan 21



Kelebihan:

Sistem dirancang sebagai panel surya

Keterbatasan:

Efisiensi solar to hidrogen masih rendah, semikonduktor fotoelektrokimia cepat terdegradasi dalam lingkungan elektrolit, stabilitas jangka Panjang rendah

Hidrogen hijau dengan metode PEMWE-Solar pv memiliki keunggulan dari teknologi elektrolisa lainnya dengan tingkat kemurnian H_2 99,995% sesuai dengan standard *ISO 14687-2 Hydrogen Fuel Quality-Product Specification* untuk kendaraan transportasi darat berbasis FCEV bahan bakar hidrogen untuk menjaga kinerja FCEV tetap handal dan aman digunakan (Morris et al. 2021) . Untuk menganalisa kualitas dari hidrogen hijau PEMWE dilakukan pengujian sampel hidrogen untuk mendapatkan gambaran komposisi unsur atau senyawa pengotor dalam bahan bakar hidrogen dengan menggunakan dokumen petunjuk *ISO 21087 Gas analysis-Analytical methods for hydrogen fuel-Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell application for road vehicles* (Omoniyi et al. 2021). Tabel 2.1 menunjukkan hasil analisa uji sampel hidrogen hijau PEMWE dan dibandingkan terhadap standard ISO 14687-2 menunjukkan unsur pengotor dalam hidrogen hijau sebagian besar dibawah ambang batas yang ditetapkan pada ISO 1468-2.

Selain itu teknologi kendaraan berbasis FCEV berkembang secara pesat, pada prinsipnya FCEV merupakan kendaraan listrik (menggunakan motor listrik), dimana listrik diperoleh dari reaksi elektrokimia di sel bahan bakar (*fuel cell*) menggunakan hidrogen. Teknologi kendaraan saat ini menunjukkan tiga jalur utama yaitu: kendaraan berbasis mesin pembakar dalam (ICE), kendaraan listrik berbasis baterai (BEV) dan kendaraan listrik berbasis sel bahan bakar hidrogen (FCEV). Dari aspek teknis, FCEV dan BEV sama-sama menggunakan motor listrik sebagai penggerak utama, sehingga memiliki efisiensi powertrain (konversi energi menjadi daya mekanik pada roda) jauh lebih tinggi dibandingkan ICE (Gunaydin et al. 2025). Dibandingkan BEV, FCEV memiliki efisiensi well to wheel (siklus

energi-emisi) lebih unggul karena hidrogen diproduksi dengan metode PEMWE-Solar pv akan menjadi solusi transportasi nol emisi yang andal (Halder at al. 2024). Kendaraan berbasis FCEV secara global telah mencapai tingkat kematangan teknis dan ekonomis layak untuk aplikasi transportasi kendaraan berkelanjutan, perbandingan efisiensi, konsumsi dan biaya per km ditunjukkan pada table 2.2 (Togun at al,225). Hal ini secara nyata dapat dilihat pada keberhasilan teknologi kendaraan penumpang berbasis FCEV yang dikembangkan tahap komersial seperti Toyota Mirai dan Hyundai Nexa yang mengadopsi teknologi *PEM Fuel Cell* (PEMFC) dengan jarak tempuh masing-masing kisaran 300-380 mil per pengisian hidrogen (Luo at al. 2025), ini mengatasi isu rentang jarak tempuh (*range anxiety*) umumnya dijumpai pada BEV. Pada segmen kendaraan performa tinggi *Sport Utility Vehicle* (SUV) seperti BMW iX5 dengan daya hingga 395 hp dan akselerasi 0-100 km/jam di bawah 6 detik, hingga kendaraan ekstrem Hyperion XP-1 mampu menjangkau lebih dari 1000 mil (densitas energi spesifik H₂ sangat tinggi, 120 MJ/kg). Seluruh kendaraan tersebut berbasis PEMFC dikarenakan unggul dalam densitas daya tinggi, waktu start up cepat, dan kompatibilitas dengan aplikasi otomotif dinamis.

Tabel 2 1 Spesifikasi kualitas hidrogen untuk kendaraan FCEV (ISO 14687-2) dibandingkan terhadap hasil uji sampel hydrogen hijau PEMWE

No	Unsur/Senyawa	Tipe I (gas) /Tipe II (liquid) μmol/mol	PEMWE μmol/mol
1	<i>Hydrogen fuel index (mole fraction)</i>	99,97%	
2	Total non hidrogen gas (maksimum)	300	
	Konsentrasi maksimum unsur pengotor		
3	Air (H ₂ O)	5	5,87±0,15 ^a
4	Total hidrokarbon tanpa metana	2	<0,015
5	Metana (CH ₄)	100	<0,010
6	Oksigen (O ₂)	5	<0,24
7	Helium (He)	300	<28
8	Nitrogen (N ₂)	300	6,87±0,37
9	Argon (Ar)	300	<0,37
10	Karbon dioksida (CO ₂)	2	0,61±0,07

11	Karbon monoksida (CO)	0,2	<0,029
12	Total senyawa Sulfur (S1)	0,004	<0,0012
13	Formaldehida (HCHO)	0,2	<0,10
14	Asam format (HCOOH)	0,2	<0,010
15	Amonia (NH ₂)	0,1	<0,010
16	Senyawa terhalogensasi (Halogen	0,05	<0,030
17	Partikel konsentrasi maksimum	1 mg/kg	1,4±0,6 ^a

^a Jumlah unsur pengotor pada PEMWE lebih besar dari ISO 14687-2 hal ini diperlukan tambahan air dan partikel ke dalam sample pengujian dan prosedur

Tabel 2 2 Perbandingan efisiensi, konsumsi dan biaya per km

No	Parameter/Biaya	ICE (BBM)	BEV (Listrik)	FCEV (Hidrogen)
1	Konsumsi bahan bakar	7-8 L/100 km (±12-14 km/L)	15-20 kWh/100 km	1 kg H ₂ /100 km
2	Harga bahan bakar/energi	Rp 10.000-13.000/L	Rp 1.400/kWh	H2 Hijau, Rp 276-550/km
3	Biaya/100 km	Rp 90.000-130.000	Rp 21.000-28.000	Rp 55.00-120.000
4	Biaya bahan bakar / km	Rp 900-1.300/km	Rp 220-290/km	Rp 550-1.200/km
5	Emisi	CO ₂ , NO _x , PM _{tinggi}	Tergantung sumber listrik	0 (PEMWE-Solar pv)
6	Waktu refueling/charging	3-5 menit	30menit-8 jam(tergantung charger)	3-5 menit
7	Efisiensi Powertrain	20%-30%	70%-85%	50%-60%

Teknologi sel surya saat ini dikembangkan terutama berbasis dari material Silicon (Si) dan Perovskite (Pe) untuk meningkatkan efisiensi konversi daya perangkat (*PCE*) maksimum sehingga diperoleh PLTS yang memiliki efisien tinggi. Berbagai cara dilakukan untuk perbaikan *PCE*, diantaranya:

1. Kontak pasif (*pasivative contact*) dan Tandem sel surya Si dan Pe dapat meningkatkan *PCE* >30% (Zhou et al. 2022) yaitu dengan mengurangi rugi-rugi rekombinasi radiasi (*thermal loss*) dan mengkombinasi sel Pe pada lapisan atas dan sel Si pada sisi bawah panel surya sehingga kontak sinar surya pada permukaan Pe dan logam konduktor menyerab iradian selanjutnya meneruskan foton ke sel Si untuk memproduksi energi listrik
2. Tandem sel surya perovskite dengan perovskite dihubungkan ke 2 terminal (2T APTSC-2 *Terminal All Perovskite Tandem Solar Cell*) merupakan penggabungan sel surya lapis atas semi tranparan dan sel surya lapis bawah dihubungkan secara seri untuk meningkatkan *PCE* mencapai 35% (Zhou et al. 2022). Kemampuan daya serab iradian sel surya lapisan atas dan bawah yang tinggi karena ketebalan perovskite lapisan atas 340-420 nm dan lapisan bawah 860-940 nm sehingga meningkatkan kecepatan mobilitas electron sebesar $5,5 \times 10^{-3} \text{ mV}^{-1}\text{s}^{-1}$ pemacu energi listrik.
3. Sel surya crystalline Silicon (c-Si) mencapai maksimum *PCE* dengan mengakomodir rugi rugi thermal dan spektrum sinar surya (Ziar at al. 2022). Entrophy merupakan bagian dari energi dalam sinar surya yang tidak dapat dikonversi oleh c-Si menjadi energi listrik, entrophy dikurangi untuk memperoleh *PCE* 29,43%.

Saat ini c-Si banyak digunakan pada pembangkit PLTS, 90% mendominasi pasar sel surya. Untuk menjaga efisiensi PLTS teknologi Si perlu diperhatikan beberapa kekurangan yang dapat mengurangi kehandalan operasi sel surya diantaranya: polycrystalline silicon (poli-Si) sel surya berbasis TOPCon (*Tunnel Oxid Passivated Contact*) akan mengalami rugi-rugi daya serab tinggi apabila lapisan poli-Si ditempatkan di sisi atas (Zhou et al. 2022). Sel surya jenis multi

crystalline akan mengalami penurunan PCE dikarenakan adanya kerapatan arus hubungan singkat pada permukaan sel surya (Kang et al. 2022).

Pada penelitian ini pendekatan perovskite teknologi 2T APTSC digunakan mensuplai kebutuhan energi listrik untuk memproduksi hidrogen hijau karena memiliki keunggulan utama diantaranya: memiliki kemampuan mengeksploitasi sinar surya lebih baik dalam menurunkan rugi energi thermal baik saat kelebihan energi foton tinggi maupun transparansi foton energi rendah (Zhao et al. 2022).

II.2 Teknologi sel surya perovskite PLTS berkapasitas tinggi

Energi sinar surya dan sel surya merupakan komponen utama untuk memproduksi energi listrik. Indonesia secara geografi beriklim tropis memiliki sumber energi sinar surya (iradian) berlimpah khususnya di IKN Penajam Kalimantan Timur dengan rata-rata tingkat radiasi 2021 sebesar $6,65 \text{ kWh/m}^2$ dan temperatur $30,35^\circ\text{C}$. Didukung dengan kemajuan teknologi sel surya perovskite (Pe) saat ini memiliki PCE hingga 35% (Zhao et al. 2022) menjadikan Pe mendapat perhatian khusus untuk diimplementasikan membangun PLTS skala besar di Indonesia daerah IKN Penajam Kalimantan Timur khususnya. Menelusuri kilas balik perkembangan sel surya dapat dikelompokkan menjadi 3 generasi yaitu (Madsuha et al. 2021):

1. Sel surya generasi pertama

Sel surya generasi pertama memiliki komposisi satu lapis berbentuk silikon wafer dihubungkan pada penghantar metal tipe n dan tipe p (n-p junction) dengan kapasitas PCE sebesar 20-24%. Tipe ini mendominasi industri sel surya skala global. Keunggulannya memiliki efisiensi yang stabil, namun memiliki kekurangan yang perlu ditingkatkan diantaranya: biaya produksi Si wafer tinggi, ruang pakum tinggi serta beberapa teknik litografi.

2. Sel surya generasi kedua

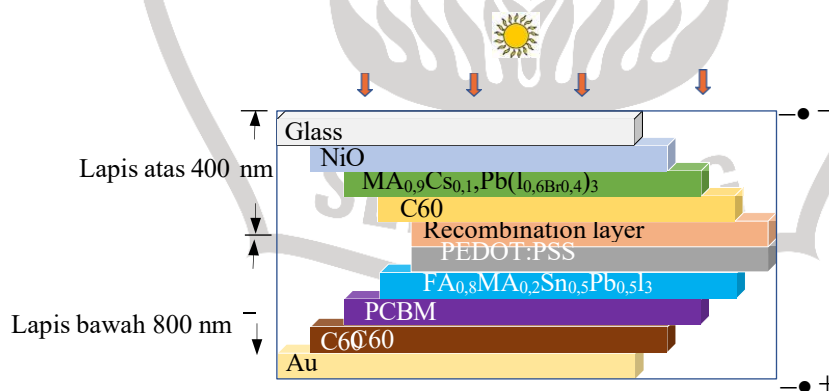
Teknologi sel surya bentuk film tipis khusus material semikonduktor anorganik seperti cadmium telluride (Cdte) dan chalcogenides seperti copper-indium-

gallium-diselenide ($\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$, CIGS). Kedua tipe ini memiliki PCE sebesar 19% dan dapat diproduksi dari bermacam substrat. Kekurangan dari sel surya film tipis ini material indium tidak banyak tersedia dan harga mahal serta material cadmium mengandung bahan beracun.

3. Sel surya generasi ketiga

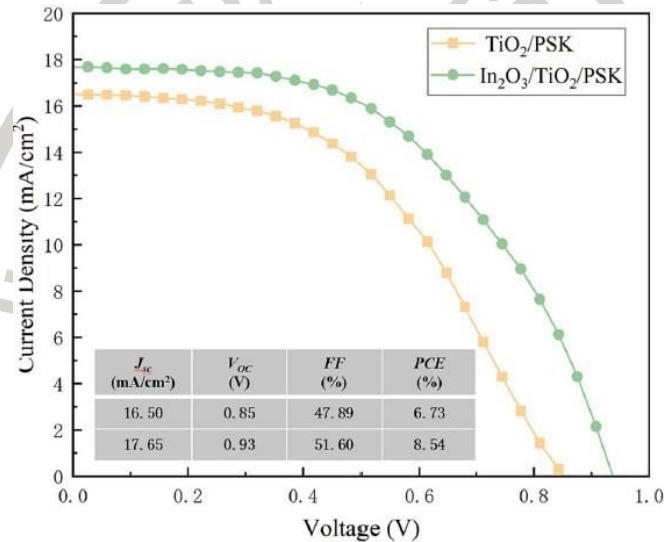
Pengembangan sel surya generasi ini yang utama adalah sel surya *dye-sensitized* (DSSC) dimana sel elektrokimia dengan elektrolit, Sel surya organik (OSC), Sel surya hibrid dan yang paling akhir sel surya perovskite (PSC). Biaya produksi tipe ini relatif rendah dibandingkan ke generasi 1 dan 2.

Sel surya perovskite (PSC) mengalami kemajuan yang besar dalam tenggang waktu yang relatif tidak lama. Teknologi PSC yang berbasis persimpangan tunggal sudah memiliki tingkat PCE sebesar 25% dan masih jauh lebih kecil apabila dibandingkan dengan batas keharusan menyerab penuh spektrum sinar surya oleh Schocley-Quiesser. Teknologi baru untuk menaikkan PCE salah satunya adalah dengan membuat multi persimpangan dan sel surya berlapis-lapis yang memiliki pita konduksi yang berbeda hingga multi serab sinar surya maksimal (Somay at al., 2022). Gambar 2.1 menunjukkan susunan material PSC berlapis lapis dengan 2 terminal tandem.



Gambar 2. 2 Susunan material PSC berlapis-lapis dengan 2 terminal tandem

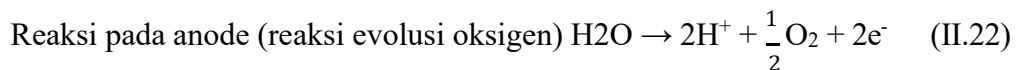
Peningkatan sel surya perovskite terus dikembangkan aspek penting yang perlu diperhatikan yaitu: aspek tipe lapisan transport elektron, ukuran lapisan dan regulasi pendukung. Untuk meningkatkan daya serap elektron dan pergerakan elektron yang tinggi, lapisan sel surya perovskite ditambahkan lapisan metal Indium oxide (In_2O_3). Indium oxide merupakan material semikonduktor tipe-N memiliki celah pita lebar (*wide band gab*) sebesar $\sim 3,75\text{eV}$ dan pergerakan tinggi sebesar $\sim 20\text{cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$ dan thermal yang stabil (Yang et al. 2023). Performance sel surya perovskite dengan Indium oxide ditunjukkan dengan kurva J-V dibawah ini:

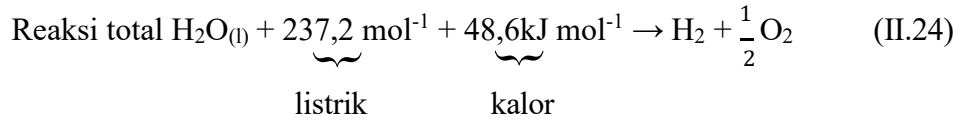


Gambar 2. 3 Kurva J-V

II.3 Model system operasi PEMWE produksi hidrogen hijau

PEMWE memiliki keunggulan memproduksi hydrogen hijau dibandingkan dengan metode elektrolisa lainnya karena dapat beroperasi maksimal pada skala industri dengan sumber energi listrik intermiten sinar surya (Brezak at al. 2023). Reaksi pemisahan hydrogen dan oksigen dari sumber air dapat ditunjukkan pada persamaan termodinamika:





Konsep dasar dari proses pemisahan hidrogen dan oksigen dari sumber air yaitu diperlukan energi listrik sebesar $237,2 \text{ mol}^{-1}$ (standar perubahan Gibbs free energi) dan energi kalor sebesar $48,6\text{kJ mol}^{-1}$ (standar molar entalpi) (Scheepers et al. 2021). Energi listrik dan kalor faktor utama dalam memproduksi hidrogen hijau serta didukung oleh teknologi membran yang memiliki kemampuan diantaranya (Ahmad Kamaroddin et al. 2021): tahan terhadap suhu panas yang tinggi dan memiliki daya mekanis yang stabil, konduksi ion maksimal (electron, proton), oksidasi tinggi dan hidrolitik stabil serta reaksi kimia tinggi dan elektrokimia stabil. Energi listrik pada modul PEMWE (stack) ditunjukkan pada persamaan 25 (Hencke et al., 2022).

$$W_{\text{stack}} = \frac{2.F.U_{\text{stack}}}{\mu F} f_{\text{loss}} \quad (\text{II.25})$$

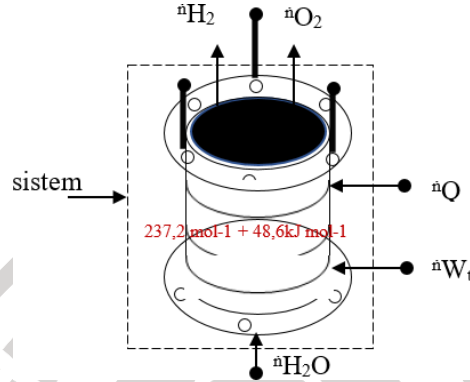
Dimana F adalah Faraday konstan, U_{stack} tegangan pada modul, μF efisiensi Faraday, f_{loss} jumlah rugi-rugi hidrogen karena tingkat rapat arus meningkat. Energi panas pada modul PEMWE (stack) akibat dari reaksi elektrokimia karena temperatur reaksi naik. Temperatur (T) dan tekanan (p) diperlukan dalam proses pemisahan hidrogen dan oksigen dari sumber air, besarnya konsumsi energi atau nilai kalor atas (HHV) (Garbe et al. 2021) ditunjukkan pada persamaan 27

$$\varepsilon_{HHV} = \frac{\Delta H^R (T.p)}{2.F.E_{\text{cell}}} \quad (\text{II.26})$$

Dimana ε_{HHV} efisiensi energi, ΔH^R perubahan energi entalpi reaksi kimia, F Faraday kontanta, E_{cell} energi listrik.

Keseimbangan energi modul PEMWE dalam sistem operasi produksi hidrogen hijau merupakan kunci utama untuk mengoptimalkan kehandalan system, khususnya skala produksi besar mega watt (MW). Ilustrasi sederhana dengan analisa termodinamika menentukan konsumsi energi listrik dan kalor yang

diperlukan dalam system modul PEMWE untuk produksi hidrogen maksimal ditunjukkan pada gambar 2.3



Gambar 2. 4 Analisa termodinamika pada modul PEMWE sistem operasional

Energi listrik (W_t) dan kalor (Q) sebagai energi suplai kedalam system termodinamika dalam kondisi laju aliran (*flow rate*) stabil (*steady state energy balance*), rugi-rugi akibat perubahan kalor, temperature dan tekanan sama dengan nol. Aliran molar air pada anoda dan neraca massa (*mass balance*) produksi oksigen pada anoda dan hidrogen pada katoda ditunjukkan pada persamaan 28, 29 dan 30 (Tijani at al. 2016):

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{n_c I}{2F} \mu F \quad (II.27)$$

$$\dot{n}_{O_2} = \frac{n_c I}{4F} \mu F \quad (II.28)$$

$$\dot{n}_{H_2O} = 1,25 \frac{n_c I}{2F} \mu F \quad (II.29)$$

Dimana; n_c = jumlah sel dalam stack, I = arus, F = Faraday konstanta, dan μF = Efisiensi Faraday. Nilai 1,25 diperoleh dari nilai kalor bawah (LHV)/(2×98485) Efisiensi Faraday ditunjukkan pada persamaan 31:

$$\mu F = \frac{Q_{id}}{Q_{re}} \quad (II.30)$$

Dimana; Q_{id} = beban ideal untuk memproduksi sejumlah hidrogen dan Q_{re} = beban yang diperlukan.

Keseimbangan sistem pada PEMWE dapat dicapai dengan memperhatikan faktor rugi rugi mekanis yang dapat mempengaruhi kinerja stack memproduksi hidrogen diantaranya: (i) temperatur operasional yang tinggi (120 °C) dapat meningkatkan kemampuan PEMWE namun berdampak pada menurunnya daya tahan sel stack salah satunya dikarenakan proton exchange membran mengalami dehidrasi, untuk menjaga agar sel stack tetap stabil dan handal dengan menggunakan membran tipis jenis Naftion 50 – 175 mikron (μm) unggul menjaga saturasi anode elektroda dengan cara mengalirkan kembali (difusi) air melalui katoda elektroda (Garbe et al. 2021). (ii) Tekanan operasional PEMWE ideal ditingkat 30 – 70 bar akan memproduksi hidrogen secara optimal dengan konsumsi energi listrik (W_t) memadai, dengan tujuan menekan rugi-rugi energi listrik (Choi et al. 2022). Operasional modul PEMWE pada beban maksimum akan meningkatkan efisiensi Faraday sebesar 99% pada temperature 45 °C dan tekanan 70 bar (Sartory et al. 2017). (iii) Temperatur dan tekanan tinggi operasional berdampak meningkatkan pertukaran rapat arus pada elektroda (elektron reduksi-oksidasi), meningkatkan reaktif elektrokimia pada permukaan elektroda ditunjukkan pada persamaan II.31 (Espinosa-López et al. 2018):

$$i_{0,an} = i_{0,an,std} \exp\left[\frac{E_{exc}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{std}}\right)\right] \quad (II.31)$$

Dimana: $i_{0,an}$ = efektif pertukaran rapat arus anoda, $i_{0,an,std}$ = pertukaran rapat arus pada kondisi level temperature dan tekanan, E_{exc} = aktivasi energi yang diperlukan untuk elektron kinetik pada anoda, R = resisten laju elektron dan proton, T = temperatur, T_{std} = Temperatur referensi

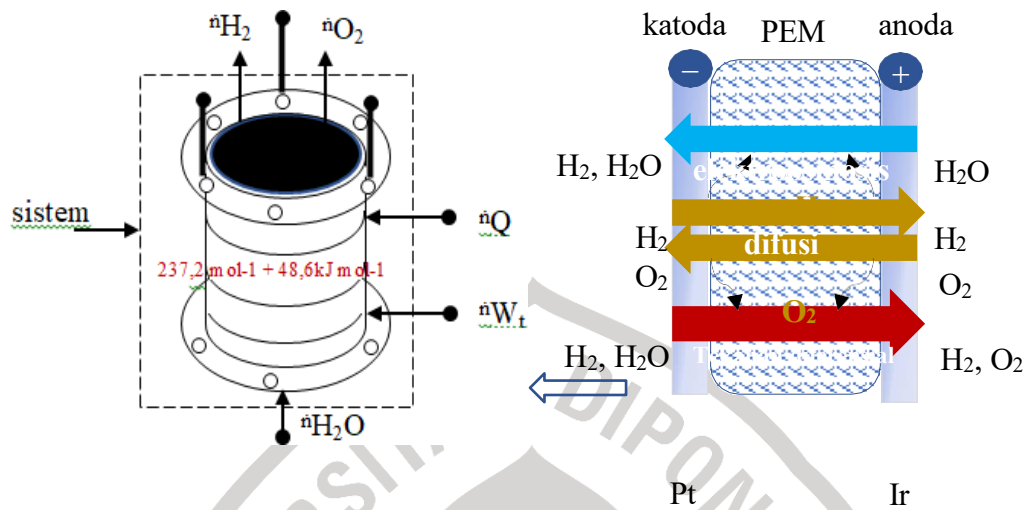
Perencanaan modul PEMWE (*stack*) memiliki aspek kunci yang perlu diperhatikan agar kehandalan *stack* tetap stabil yaitu: (i) reaksi menuju stack merata (ii) reaksi di dalam sel stack merata (iii) minim rugi-rugi dampak dari reaksi (iv) tidak ada kebocoran gas (v) memiliki kemampuan mekanis yang kokoh. Komponen utama

modul PEMWE terdiri dari membran rakitan elektroda (MEA) dengan lapisan transportasi berpori disisi anoda, lapisan difusi gas pada sisi katoda dan sepasang gasket dipasang dan diikat dengan 8 baut dengan torsi 75 kgf cm (Choi et al. 2022). Modul PEMWE terdiri dari beberapa sel *stack* yang disesuaikan dengan kapasitas produksi hidrogen yang diinginkan. Kualitas membran yang baik merupakan faktor penting meningkatkan kehandalan PEMWE dan menghasilkan produk hidrogen murni (Ahmad Kamaroddin et al. 2021). Membran penukar proton (PEM) jenis perfluorosulfonated acid (PFSA) memiliki kemampuan penghantar proton terbaik khususnya dengan memanfaatkan sumber energi intermiten sinar surya dan stabil pada operasional tekanan tinggi (Hancke et al. 2022). Air yang masuk melalui PEM menuju katoda dengan cara elektro-osmosis, difusi dan tekanan gradien (Su, Xu, and Hu 2022). Elektroosmosis merupakan reaksi terhadap beberapa molekul air diiringi bersamaan dengan beberapa proton, reaksi elektrokimia terjadi pada permukaan elektroda (anoda dan katoda) dengan cara difusi, air mengalir di dalam PEM disebabkan oleh perbedaan tekanan elektroda, ΔP , aliran air ditentukan oleh permeabilitas membrane dan dapat dihitung dengan persamaan Darcy ditunjukkan pada persamaan (Liso et al. 2018).

$$N_{H_2O}^{pe} = K_{Darcy} \frac{A \rho_{H_2O} \Delta P}{\delta_{mem} \mu_{H_2O} M_{mH_2O}} \quad (mol/s) \quad (II.32)$$

Dimana: K_{Darcy} = permeabilitas membrane air, μ_{H_2O} = viskositas, M_{mH_2O} = mass molar, A = luas area sel, ρ_{H_2O} = kepadatan air, δ_{mem} = tebal membran

Mekanisme aliran air melalui PEM menuju katoda dengan reaksi elektroosmosis, difusi dan tekanan diferensial memisahkan hidrogen dan oksigen ditunjukkan pada gambar 2.4 dibawah ini:



Gambar 2. 5 Proses pemisahan hidrogen dan oksigen melalui PEM dengan reaksi elektroosmosis, difusi dan tekanan diferensial

Proses elektrokimia merupakan hal yang mendasar pada PEMWE karena dapat mengukur tingkat reaksi molekul dalam sel seperti ditunjukkan pada gambar 2. Air dan proton bereaksi secara elektroosmosis di dalam PEM menarik H_2 (mol/scm^2), tingkat elektroosmosis flux sebanding dengan rapat arus (A/cm^2) dalam sel. Difusi berbalik H_2O melalui PEM menuju anoda terjadi karena reaksi di katoda memproduksi H_2O lebih besar dari anoda, difusi berbalik ini terjadi apabila temperatur pada sel naik. Perbedaan tekanan pada katoda kompartemen dan anoda memicu H_2 berdifusi berbalik dari katoda menuju anoda melalui PEM, tingkat H_2 difusi berbalik dapat diukur menggunakan persamaan Fick (Durmus, at al. 2021) ditunjukkan pada persamaan 34

$$\dot{n}_{\text{difusi berbalik}} = DA \frac{\Delta C}{t_m} \quad (\text{II.33})$$

Dimana: D = difusi berbalik H_2 di dalam PEM, A = area aktif membran, ΔC = perbedaan konsentrasi pada katoda dan anoda, t_m = tebal membrane.

Katalis diperlukan untuk meningkatkan kehandalan sel PEMWE, jenis logam Platinum (Pt) dan Iridium (Ir) banyak digunakan untuk memproduksi hidrogen skala besar komersial karena memiliki tingkat stabilitas tinggi dan masa hidup sel yang panjang (perkiraan 7-10 tahun pada operasional stabil) (Ayers 2021).

Pelapisan katalis pada elektroda katoda (Pt) dan anoda (Ir) dapat dilakukan



banyak metoda, namun yang banyak digunakan saat ini dengan memberi lapisan pada area permukaan elektroda dengan cara menyemprotkan cairan logam Pt dan Ir (*ultrasonic spray coating*) yang komposisi persentase katalis disesuaikan kapasitas dan kondisi operasional PEMWE (Lopata et al. 2022).

Faktor penting lainnya dalam pengoperasian PEMWE yaitu pengaturan pada sistem aliran air dan thermal antara lain:

1. Keseimbangan distribusi air agar sel tidak kelebihan air atau kering, kelembaban pada membrane penukar proton diatur agar saat proses pemisahan molekul air (H_2O) dari penguapan air menjadi gas (hidrogen dan oksigen) menjadi optimal. Konsumsi air pada saat reaksi pemisahan air dibandingkan dengan jumlah air masuk tidak dipertimbangkan, karena secara implementasi jumlah air masuk akan lebih besar sepuluh kali dari jumlah air dikonsumsi.
2. Optimalisasi temperatur agar struktur membran penukar proton tetap stabil dan meningkatkan konduktivitas proton. Lapisan difusi gas (GDL) media berpori mengalirkan air, elektron dan gas (H_2/O_2) akan berfungsi maksimal pada tingkat panas yang memadai
3. Keseimbangan keluar - masuk aliran massa dan panas yang dihasilkan-dikonsumsi system. Panas yang dihasilkan system saat proses pemisahan air ($2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$) sebagai akibat dari konsumsi energi listrik pada kondisi standar ditunjukkan (Möckl et al. 2020):

$$E_{\min} = \frac{\Delta G_{298}^0}{2.F} = 1,23V \quad (II.34)$$

Gibbs free energy $\Delta G_{298}^0 = 237 \text{ kJ/mol}$ (energi masukan kerja reaksi)

Faraday = 96,485 C/mol

$$E_{tn} = \frac{\Delta H_{298}^0}{2.F} = 1,48V \quad (II.35)$$

Enthalpy $\Delta H_{298}^0 = 286 \text{ kJ/mol}$ (perubahan energi listrik dan thermal)

ΔG dan ΔH ditentukan oleh tingkat temperatur pada sistem. Panas yang dihasilkan pada sistem ($\dot{w}$) dengan tingkat temperatur masukan (T_{in}) dan

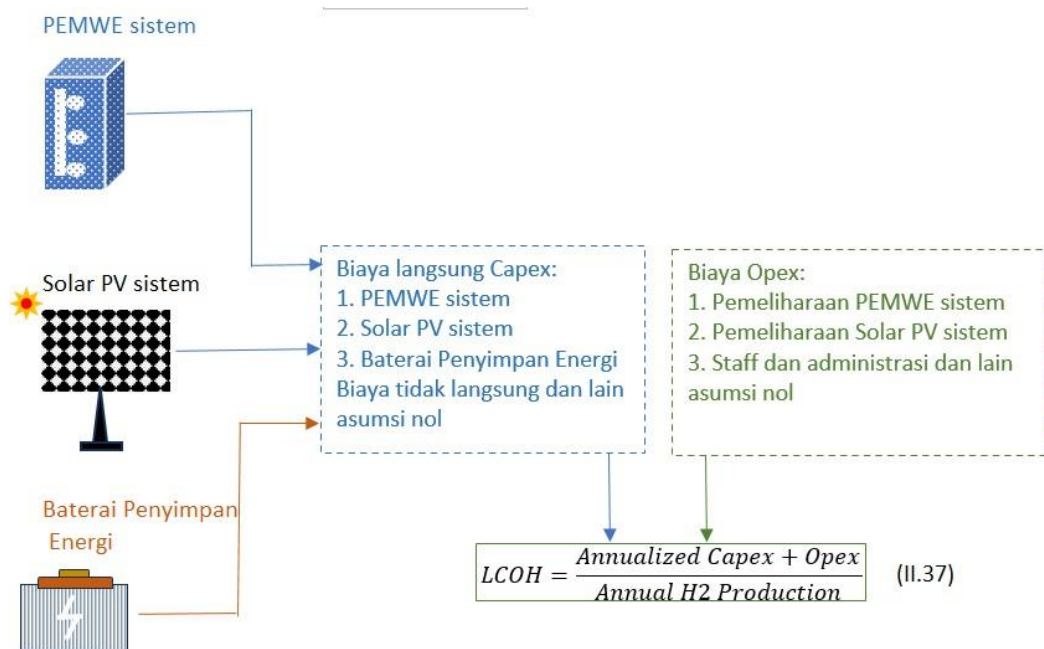
keluaran (T_{out}), aliran massa air ($\dot{m}_{H_2O}$) dan spesifik panas air (C_{p,H_2O}) dapat dihitung dengan persamaan seperti ditunjukkan:

$$\dot{\omega} = \dot{m}_{H_2O} C_{p,H_2O} (T_{out} - T_{in}) \quad (II.36)$$

Hidrogen hasil produksi PEMWE merupakan tahap penting selanjutnya perlu penanganan khusus untuk disimpan dalam bejana tekan (tanki penyimpanan) atau langsung dialirkan kedalam pipa transmisi sebelum hidrogen digunakan sebagai bahan bakar kendaraan FCEV.

II.4 Analisa ekonomi PEMWE berbasis sumber energi Solar photovoltaic

Analisa yang menyeluruh terhadap komponen biaya utama dilakukan untuk mendapatkan gambaran kelayakan finansial dan keberlanjutan produksi hidrogen. Komponen biaya utama terdiri: Biaya investasi awal (*Capex*), Biaya operasional tahunan (*Opex*) (Haeseong Shin et al. 2023). Perhitungan nilai *Capex* dan *Opex* secara komprehensif dapat menentukan biaya rata-rata produksi hidrogen (*LCOH- Levelized Cost of Hydrogen*) per satuan massa (USD/kg H_2). Gambaran kerangka keterkaitan perhitungan biaya ditunjukkan pada gambar 2.5 dengan persamaan II.37:



Gambar 2. 6 Kerangka perhitungan biaya utama Capex dan Opex

II.5 Sistem pendukung suplai air pada PEMWE-Solar pv

PEMWE-Solar pv memproduksi hidrogen memerlukan pasokan air dengan kualitas dan kuantitas dikontrol. Pada implementasi nyata, sumber air dapat berasal dari air laut atau air Sungai yang terlebih dahulu melalui proses pengolahan, seperti desalinasi dan pemurnian, untuk mendapatkan air bersih yang sesuai dengan spesifikasi PEMWE-Solar pv. Penelitian ini menggunakan matlab/simulink/simscape dalam melakukan permodelan dan simulasi dengan mempertimbangkan suplai air secara kontinu dan stabil ke sistem PEMWE-Solar pv. Konfigurasi sistem terintegrasi suplai air ke PEMWE-Solar pv ditunjukkan pada gambar 2.7



Gambar 2. 7 Suplai air bersih desalinasi teknologi Reverse Osmosis

Konsep suplai air bersih berbasis desalinasi Reverse Osmosis (RO) sebagai pendukung operasional PEMWE-Solar pv, sumber air diperoleh dari air laut atau air sungai diproses menggunakan teknologi RO untuk menurunkan salinitas dan kandungan ion terlarut (Siahaan et al.2022).