

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Ibu kota Nusantara (IKN) dirancang sebagai kota berkelanjutan di dunia, yang menciptakan kenyamanan, keselarasan dengan alam, ketangguhan melalui efisiensi penggunaan sumber daya dan rendah karbon, yang mengintegrasikan pertumbuhan penduduk, kebutuhan energi, dan sistem transportasi berkelanjutan (UU No.21 tahun 2023). Berdasarkan undang-undang nomor 3 tahun 2022 sebagaimana direvisi dalam undang-undang nomor 21 tahun 2023, wilayah daratan IKN mencakup sekitar 256.142 hektar (2.561,4 km²) dengan jumlah penduduk saat ini sekitar 155 ribu jiwa dan proyeksi mencapai 1,91 juta jiwa pada tahun 2045 (Otorita IKN No.3/2024). Seiring dengan pertumbuhan penduduk tersebut, kebutuhan energi dan mobilitas perkotaan diperkirakan meningkat secara signifikan khususnya pada sektor transportasi darat. Jumlah kendaraan dan tingkat konsumsi bahan bakar fosil yang akurat di IKN saat ini belum memadai, oleh karena itu, penelitian ini melakukan prediksi estimasi berdasarkan kumpulan data 2023 di Jakarta. Jumlah kendaraan dan konsumsi bahan bakar fosil ditunjukkan pada tabel 1 dan tabel 2 dibawah ini:

Tabel 1. 1 Prediksi estimasi jumlah Kendaraan Bermotor, 2025 di IKN

Lokasi	Mobil Penumpang	Bus	Mobil Barang	Sepeda Motor	Kendaraan Khusus	Total
	18,6 %	1,5 %	3,8 %	75,4 %	0,7 %	100 %
IKN	355.519	29.077	71.699	1.440.711	12.993	1.910.000

Catatan: Jumlah kendaraan diambil dari Kumpulan data di Jakarta terhadap jumlah penduduk di IKN (1 orang untuk 1 mobil).

Tabel 1. 2 Prediksi konsumsi bahan bakar fosil Kendaraan Bermotor, 2045 di IKN

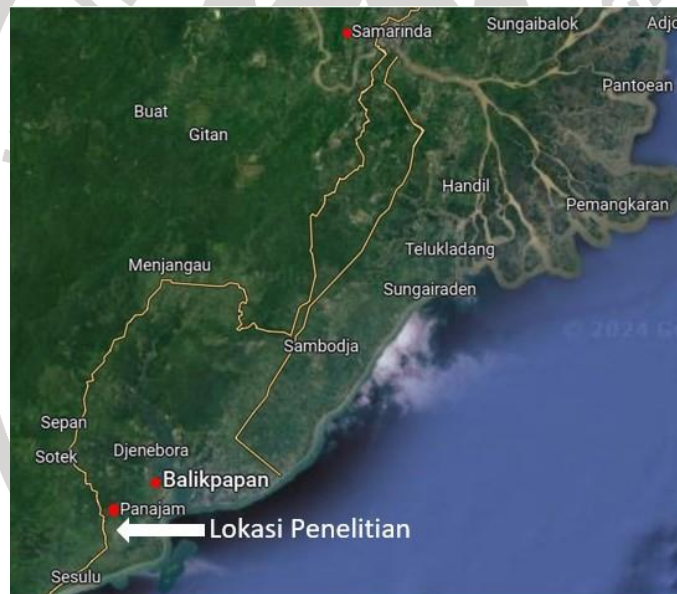
Tahun	Bahan Bakar fosil (kilo liter)	
	Gasoline RON92	BioGasoil
	15 %	85 %
2045	459.206	2.632.895

Catatan: Mengacu dari Kumpulan data bahan bakar di Jakarta disesuaikan proyeksi Jumlah penduduk di IKN

Jumlah kendaraan diperkirakan mencapai 1.910.000 unit, dengan komposisi kendaraan didominasi oleh sepeda motor 75,4% (1.440.711 unit), diikuti oleh mobil penumpang 18,6% (12.993 unit), mobil barang 3,8% (71.699 unit), bus 1,5% (29.077 unit), dan kendaraan khusus 0,7% (12,993 unit). Struktur jumlah kendaraan ini diperoleh mengacu pada kumpulan data jumlah kendaraan di Jakarta kemudian disesuaikan terhadap prediksi estimasi jumlah penduduk di IKN tahun 2045. Merujuk dari jumlah kendaraan tersebut dihitung jumlah konsumsi bahan bakar fosil untuk masing-masing kendaraan bermotor mencapai total 3.092.101 kiloliter per tahun, yang terdiri dari 15% Gasoline RON92 (459.206 kiloliter) dan BioGasoil 85% (2.632.895 kiloliter). Prediksi estimasi bahan bakar fosil ini disusun dari kumpulan data konsumsi bahan bakar fosil di Jakarta diproyeksikan terhadap jumlah kendaraan di IKN tahun 2045. Keterbatasan ketersediaan data kuantitatif terkait jumlah kendaraan dan tingkat konsumsi bahan bakar fosil di wilayah ibu kota Nusantara (IKN) menjadi salah satu kendala utama dalam penyusunan analisis potensi pemanfaatan hidrogen sebagai bahan bakar transportasi. Mengingat IKN masih berada pada tahap pengembangan, data historis yang representatif mengenai aktivitas transportasi perkotaan dan konsumsi energi belum tersedia secara memadai. Oleh karena itu, Kumpulan data dari wilayah Jakarta digunakan sebagai referensi pembandingan (proxy data) dengan mempertimbangkan kesamaan fungsi Jakarta

sebagai pusat aktivitas perkotaan berskala nasional. Pendekatan ini dilakukan untuk memperoleh estimasi konservatif terhadap kebutuhan energi dan potensi emisi, sekaligus sebagai dasar analisis skenario transisi energi. Selain itu penggunaan data Jakarta dimaksudkan untuk memberikan gambaran pencegahan dini terhadap resiko perkembangan sistem transportasi IKN yang tidak terkendali, agar pola pertumbuhan konsumsi energi dan emisi yang terjadi di Jakarta tidak terulang di IKN

IKN berada disebelah utara Kota Balikpapan dan sebelah Selatan Kota Samarinda memiliki luas wilayah darat sebesar 256,142 hektar yang terdiri dar 54 wilayah administrative setingkat desa atau kelurahan, lokasi penelitian (Latitude: - 1.1551 dan Longitude: 116.5912) ditunjukkan pada gambar 1.1



Gambar 1. 1 Lokasi penelitian (Latitude: - 1.1551 dan Longitude: 116.5912) di Panajam Paser Utara Kalimantan Timur

Wilayah Kawasan IKN sendiri memiliki luas kurang lebih 56,180 hektar terletak pada dua kabupaten eksisting, yaitu Kabupaten Penajam Paser Utara dan Kabupaten Kutai Kartanegara. Perencanaan pembangunan IKN jangka panjang mengacu pada delapan prinsip salah satu prinsip utamanya yaitu mewujudkan kota energi, pemanfaatan energi terbarukan dan rendah karbon emisi. Mengacu pada prinsip

utama ini maka penelitian energi hijau ini diharapkan dapat diimplementasikan di IKN. Energi hijau sebagai pengganti energi hitam seperti ditunjukkan pada gambar 1.2 dibawah ini.



Gambar 1. 2 Energi Hijau Pengganti Energi Hitam

Kebutuhan akan energi di Indonesia saat ini semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan pengembangan ekonomi nasional (Putri et al. 2025.). Proyeksi terbaru menunjukkan kebutuhan energi final Indonesia diperkirakan meningkat dari 195 juta ton minyak equivalen (Mtoe) pada tahun 2020 menjadi sekitar 556,5 Mtoe pada tahun 2060, dengan perincian kebutuhan per-sektor dan bentuk energi yang digunakan. Sektor transportasi, yang pada tahun 2020 menyumbang 19% dari total permintaan energi nasional dan diproyeksikan meningkat menjadi 22% pada tahun 2060, didorong oleh peningkatan kebutuhan mobilitas, kepemilikan kendaraan, serta penetrasi bertahap system transportasi berbasis listrik dan hidrogen (Liun et al. 2022). Peningkatan kebutuhan energi ini tampak jelas di Jakarta, dengan pasokan listrik pada tahun 2023 mencapai 36,992,354,101 kWh untuk 5,225,077 pelanggan (Triana et al. 2024). Kendaraan bermotor meningkat signifikan dengan total 22,6 juta unit dari berbagai jenis dan ukuran kendaraan dan konsumsi bahan bakar fosil jenis gasoline RON-92 sebesar 5,438,351 kilo liter dan BioGasOil (biosolar) sebesar 31,181,237 kilo liter per tahun 2023 (ESDM.,2023). Konsumsi energi final tahun 2025 diperkirakan mencapai 8,66 Mtoe, dengan sektor transportasi menjadi kontributor terbesar sebesar 40,4%

dan konsumsi bahan bakar fosil (BBM) sebesar 38,2% (RUED Jakarta., 2022). Lonjakan permintaan ini menimbulkan tantangan lingkungan yang kompleks, terutama penurunan kualitas udara, dimana konsentrasi partikulat halus ($PM_{2.5}$) berada diatas $50\mu g/m^3$, jauh melebihi ambang batas aman $15\mu g/m^3$ (Teresia et al. 2025.). Dampaknya dapat meningkatkan resiko penyakit pernapasan dan kardiovaskular pada masyarakat.

Memitigasi dan melindungi kualitas kesehatan masyarakat, pemerintah Indonesia menerbitkan undang-undang nomor 3 tahun 2022 mengenai pengembangan dan pengelolaan Ibu Kota Negara (IKN) Nusantara sebagai kota dunia berkelanjutan yang berlandaskan kenyamanan, keselarasan dengan alam, efisiensi sumber daya, ketahanan, dan Pembangunan rendah karbon (UU No.2/2022). Mengambil pelajaran dari ibu kota Jakarta, penelitian ini mengkaji integritas sistem pembangkit tenaga surya (solar pv) dengan *proton exchange membrane water electrolyzer* (PEMWE) menggunakan Matlab/Simulink/Simscape untuk memproduksi hidrogen hijau di IKN, Penajam paser utara, Kalimantan Timur sebagai bahan bakar kendaraan listrik berbasis *Fuel Cell Electrical Vehicle* (FCEV). Lokasi tempat penelitian ditunjukkan pada gambar 1. Tujuan utama penelitian ini meminimalkan emisi CO_2 di IKN dan mendukung pencapaian target nasional Indonesia menuju net zero emisi 2060 atau lebih cepat melalui peningkatan pemanfaatan energi terbarukan sebagaimana diamanatkan dalam regulasi ESDM No. 10/2025. Kebaharuan penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka permodelan dan simulasi yang sepenuhnya terintegrasi untuk mengevaluasi performa teknik, ekonomi, dan dampak lingkungan secara holistic, berbeda dengan studi sebelumnya mengevaluasi PEMWE, Solar pv dan aspek lingkungan secara terpisah. Jumlah dan jenis kendaraan bermotor berkontribusi meningkatkan emisi CO^2 dan konsumsi bahan bakar fosil di Jakarta ditunjukkan pada tabel 1 dan tabel 2 dibawah ini:

Tabel 1. 3 Jumlah Kendaraan Bermotor yang Terdaftar Menurut Wilayah dan Jenis, (Statistik Transportasi Provinsi DKI Jakarta 2022)

	Mobil Penumpang	Bus	Mobil Barang	Sepeda Motor	Kendaraan Khusus	Total
Jakarta Pusat	467,194	52,475	135,684	1,331,878	12,083	1,999,314
Jakarta Utara	397,568	27,757	73,179	1,410,480	40,873	1,949,857
Jakarta Barat	849,328	87,268	159,996	2,506,546	113,781	3,666,919
Jakarta Selatan	746,004	97,826	126,459	1,978,001	12,977	2,962,067
Jakarta Timur	471,899	27,916	83,693	2,149,741	16,028	2,749,277
Bodetabek	1,278,397	51,115	270,121	7,934,827	58,139	9,592,599
TOTAL	4,210,390	344,357	849,132	17,062,273	153,881	22,620,033

Catatan: Tidak termasuk kendaraan TNI, Polri dan Korps Diplomatik
Sumber Ditlantas Polda Metro Jaya, 2023

Tabel 1. 4 Konsumsi bahan bakar fosil kendaraan bermotor berdasarkan jenisnya

Tahun	Jenis Bahan Bakar (kilo liter)	
	Gasoline RON92	BioGasOil (Diesel)
2023	5,438,351	31,181,237

Sumber: ESDM Energi dan ekonomi statistik Indonesia, 2023

Pengalaman dari ibukota Jakarta, penurunan kualitas udara akibat emisi CO₂ kendaraan transportasi, menjadi pelajaran penting bahwa teknologi transportasi rendah karbon harus diterapkan sejak dini di IKN agar tidak mengulang dampak lingkungan yang sama. Sejalan dengan komitmen Indonesia terhadap target net zero emisi 2060 serta mandat energi terbarukan berdasarkan peraturan menteri ESDM No. 10/2025, hydrogen hijau muncul sebagai alternatif strategis. Sebagai pembawa energi bersih yang sesuai digunakan untuk kendaraan listrik berbasis FCEV, hidrogen mampu memberikan nol emisi serta potensi dekarbonisasi yang signifikan bagi sektor transportasi di IKN.

Penelitian ini, melakukan permodelan dan simulasi sistem energi Solar pv-PEMWE menggunakan Matlab/Simulink/Simscape (Brezak at al., 2023), untuk menganalisa diantaranya: perilaku dinamis sistem, proses konversi energi listrik menjadi energi kimia untuk memproduksi hidrogen, dan kondisi interaksi sinar iradian di lokasi pembangkit. Tujuan utamanya, menentukan konfigurasi optimal terkait daya input, kapasitas elektrolisa, dan laju produksi hidrogen yang sesuai untuk bahan bakar FCEV di IKN, sekaligus berkontribusi dalam meningkatkan kualitas udara. Peneliti menyadari, PEMWE-Solar pv ini memerlukan pengembangan teknologi lanjutan untuk mendapatkan tingkat efisiensi yang optimal.

Solar pv-PEMWE sistem ini diharapkan dapat menjadi masukan bagi para pembuat kebijakan di pusat maupun di daerah untuk mengintegrasikan hidrogen hijau kedalam ekosistem energi dan transportasi di IKN, diantaranya dengan menyediakan jalur produksi yang tervalidasi secara teknis, manfaat lingkungan yang terukur, dan indikasi investasi yang jelas (Konsep IKN). Faktor kunci yang mendorong minat investor meliputi pengembangan kerangka regulasi yang memberikan insentif finansial, serta subsidi modal, kredit carbon, dan pembebasan pajak barang import. Diharapkan juga, dengan mengkombinasi validasi teknis, manfaat lingkungan, dan selaras dengan arah regulasi nasional, hidrogen hijau ini berpotensi menjadi fondasi transisi IKN menjadi ekosistem perkotaan yang tangguh dan rendah karbon.

Intensitas emisi dari sektor transportasi di Jakarta memerlukan tindakan mitigasi yang komprehensif. Jumlah dan jenis kendaraan meningkat setiap tahunnya dan menjadi penyumbang besar kenaikan emisi CO₂ yaitu sebesar 24,64 % hanya dari sektor transportasi (Nasional, 2022). Populasi kendaraan bermotor di Jakarta dan wilayah Bodetabek mencapai 22,62 juta unit pada tahun 2022, didominasi oleh sepeda motor (17,06 juta unit) dan diikuti mobil penumpang (4,21 juta unit). Armada kendaraan yang sangat besar ini menjadi penyumbang utama emisi CO₂, polusi udara dan degradasi lingkungan. Dengan menggunakan faktor

emisi rata-rata mesin pembakaran internal (ICE) sebesar 2,3 kg CO₂/L untuk bensin (RON-92) dan 2,7 kg CO₂/L untuk diesel basis transportasi di Jakarta diperkirakan menghasilkan puluhan juta kilogram CO₂ setiap tahun. Strategi mitigasi yang bersifat sistemik dan berlapis, termasuk transisi dari kendaraan berbasis BBM ke mobilitas nol emisi, perluasan penggunaan FCEV, serta Pembangunan infrastruktur pendukung seperti stasiun pengisian hidrogen. Kondisi lingkungan Jakarta dijadikan pembelajaran penting untuk IKN memulai pro-aktif intervensi terhadap lonjakan pertumbuhan penduduk dan kepemilikan kendaraan agar target lingkungan bebas emisi CO₂ tercapai. Data kendaraan konsumsi BBM bensin dan diesel yang ditampilkan pada tabel 1 masih merupakan alokasi estimasi tingkat nasional, untuk tingkat Jakarta belum tersedia, sehingga untuk mendapatkan perhitungan dampak pemakaian BBM terhadap emisi CO₂ dapat dilakukan pendekatan perhitungan hasil produksi hidrogen dikalikan 4,37 kg CO₂-eq/kd H₂ (Liu et al., 2021).

Beberapa hidrogen hijau alternatif diantaranya selain energi sinar surya (*solar photovoltaic*) yaitu energi tenaga air (*hydro power*), energi tenaga angin (*wind power*) dan energi tenaga nuklir. Prinsip kerja energi sinar surya diperoleh dengan mengkonversi sinar surya (*irradiance*) menjadi energi listrik menggunakan panel surya (Hao et al. 2022), energi potensial tenaga air dimanfaatkan untuk mengkonversi energi mekanik menggerakkan turbin dan pompa air dihubungkan ke poros generator untuk menghasilkan energi listrik dan pompa air untuk mengalirkan air ke kolam penampungan (Hoffstaedt et al. 2022), energi kecepatan angin dengan memperhatikan faktor meteorologi dimanfaatkan untuk mengkonversi energi mekanik menggerakkan turbin dihubungkan ke poros generator untuk menghasilkan energi listrik (Wang, Shen, and Ma 2022) dan energi panas nuklir dalam reaktor dikonversi menjadi energi mekanik dihubungkan ke poros generator dan panas yang dihasilkan dapat disimpan (*thermal energy storage*) untuk meningkatkan kapasitas listrik yang dihasilkan (Kindi et al., 2022). Energi sinar surya memiliki keunggulan dari energi alternatif lainnya diantaranya ketersediaan radiasi sinar surya yang memadai di Indonesia, khususnya di IKN dan didukung teknologi sel surya

yang memiliki tingkat konversi daya tinggi, sel surya jenis perovskite dipilih untuk penelitian ini karena memiliki efisiensi konversi daya (*PCE, Power Conversion Efficiency*) sebesar 30,5%-35% (Zhao et al. 2022) . Model pembangkit energi sel surya dirancang untuk memenuhi kebutuhan daya listrik membran penukar proton elektrolisa air untuk proses pemisahan air menjadi hidrogen. Perangkat lunak matlab dan simulink digunakan untuk permodelan pembangkit energi sel surya ini.

Teknologi elektrolisa untuk proses produksi hidrogen saat ini semakin menarik perhatian, banyak penelitian dilakukan secara global bahkan sudah sampai pada tahap komersial diantaranya: teknologi *Solid Oxid Electrolysis* (SOE), *Alkaline Electrolysis* (AE) dan teknologi membran penukar proton elektrolisis air (PEMWE). Kemampuan PEMWE dalam memproduksi hidrogen skala besar mencapai 4000-40,000 kgH₂/hari (Nguyen et al. 2019). PEMWE memiliki keunggulan dibandingkan SOE dan AE diantaranya; sistem operasi PEMWE lebih fleksibel, memerlukan waktu kurang dari 1 menit untuk memulai proses operasional (start up), respon lebih cepat hanya memerlukan waktu beberapa detik dapat mencapai daya puncak dari keadaan tidak operasi (*idle*) dan lebih aman, tingkat kemurnian tinggi (*purity*) 99,9% dibandingkan AE 99,5% (Lee et al. 2021), proses pemisahan hidrogen (H₂) dan oksigen (O₂) dari sumber air (H₂O) lebih aman dan dapat menghasilkan hidrogen bertekanan tinggi (>200 bar) tanpa memerlukan eksternal mekanis kompresor agar hidrogen dapat dialirkan ke tempat penyimpanan (Durmus, Colpan, and Devrim 2021),

Hidrogen hasil produksi metode PEMWE-Solar pv direncanakan untuk digunakan sebagai bahan bakar kendaraan berbasis FCEV di IKN. Teknologi PEMWE memiliki peluang besar dilakukan di IKN Kalimantan Timur. Dipilihnya lokasi IKN posisi area di Penajam Paser Utara dengan pertimbangan memiliki beberapa keunggulan diantaranya; sumber energi radiasi sinar surya yang memadai untuk mendukung pembangunan fasilitas PEMWE-Solar pv untuk memproduksi hidrogen skala besar dimana rata rata tingkat radiasi sinar surya pertahun dari awal tahun 2021 sampai akhir tahun 2022 sebesar: 6,65 kWh/m² dan temperatur 30,35 °C

(diakses dari *data web based NASA*, power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/), ketersediaan lahan masih luas untuk pemasangan pembangkit energi sinar surya, penataan infrastruktur lebih mudah untuk membangun fasilitas PEMWE-Solar pv dan imfrastruktur seperti akses pemasangan pipa transport hidrogen dari sumber ke tempat penyimpanan.

Penelitian ini dilakukan pada saat IKN sedang memulai tahap pembangunan, oleh karena itu tingkat kebutuhan bahan bakar hidrogen untuk kendaraan berbasis FCEV mempertimbangkan tingkat pertumbuhan kendaraan di Jakarta sebagai pendekatan menentukan jumlah unit kendaraan di IKN. Diharapkan dengan adanya informasi dari penelitian ini dapat memberikan referensi bagi pihak yang membutuhkan. IKN akan menjadi pioner memproduksi hidrogen hijau skala besar dalam mendukung kebijakan menurunkan tingkat emisi GRK di Indonesia. Menjadi penting bagi pihak pelaku pengembangan hidrogen hijau baik pemerintah dan swasta nantinya akan menyesuaikan konsep pengembangan hidrogen hijau berkelanjutan terhadap perkembangan tingkat pertumbuhan perekonomian dan penduduk di IKN untuk menentukan spesifik kapasitas produksi hidrogen (Dincer at al.2022). Dilakukan analisa aspek keekonomian untuk memproduksi hidrogen hijau ini seperti Capital Expenditure (CapEx), Operational Expenditure (OpEx), Levelized Cost of Hidrogen (LCOH) dan Weighted Average Cost of Capital (WACC) sebagai referensi kelayakan implementasi.

I.2 Perumusan Masalah

Tingkat emisi sektor energi di Indonesia tahun 2022 sebesar 536,4 juta ton CO₂eq kontribusi dari beberapa sektor seperti: pembangkit listrik 243, industri 100,7, transportasi 161,6, rumah tangga 25,3, komersial 1,6 dan lainnya 4,2 dibandingkan terhadap realisasi penurunan emisi sebesar 91,5 juta ton CO₂eq (Nasional n.d.) menunjukan kualitas udara kotor yang dapat mengganggu kesehatan manusia dan berdampak pada kenaikan suhu. Kondisi ini refleksi nyata di Jakarta dimana dominasi kendaraan berbasis bahan bakar fosil (BBM)

berkontribusi signifikan terhadap peningkatan emisi CO₂ dan polutan udara lainnya dan juga memperburuk kualitas lingkungan yang selanjutnya meningkatkan resiko gangguan pernapasan. Strategi untuk meningkatkan realisasi penurunan emisi dengan cara melakukan transisi energi dari energi fosil ke energi ramah lingkungan diantaranya dengan memproduksi hidrogen hijau dengan metode PEMWE-Solar pv untuk digunakan sebagai bahan bakar kendaraan berbasis FCEV di IKN, dengan tujuan meningkatkan kualitas udara bersih dan bebas emisi CO₂. Hidrogen hijau memiliki potensi besar untuk mengurangi tingkat emisi CO₂ karena semakin berkembangnya teknologi sel surya dan membran penukar proton elektrolisa air yang dapat menekan biaya dan meningkatkan efisiensi. Model dan simulasi hidrogen hijau penelitian ini dilakukan dengan pertimbangan biaya rendah dibandingkan dengan melakukan eksperimen akan memerlukan biaya tinggi dengan mengupayakan faktor teknis dan ekonomis sebagai referensi kelayakan implementasi

Pembangkit PEMWE didukung sumber energi solar photovoltaik dirancang untuk memproduksi hidrogen ramah lingkungan karena tidak menggunakan bahan bakar bersumber dari minyak bumi. Penelitian ini merancang PEMWE-Solar pv mempertimbangkan variabel diantaranya:

1. Bagaimana merancang model PEMWE berbasis energi solar photovoltaik (solar pv) untuk memproduksi hidrogen sebagai bahan bakar kendaraan berbasis FCEV di IKN.
2. Bagaimana kinerja dari sistem PEMWE berbasis solar pv pada variasi temperatur dan densitas arus terhadap tingkat produksi hidrogen dengan konsumsi energi spesifik (kWh/kg H₂).
3. Berapa potensi reduksi CO₂ yang dicapai terhadap hasil produksi hidrogen dibandingkan dengan kendaraan berbahan bakar fosil konvensional
4. Berapa nilai LCOH (USD/kg H₂) diperoleh dari analisa keekonomian (Capex, Opex, Life cycle PEMWE-solar pv dan tingkat diskonto/WACC).

I.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini menggunakan *software Matlab/Simulink/Simscape* untuk melakukan permodelan dan simulasi tingkat produksi hidrogen hijau metode PEMWE skala besar yang dapat dihasilkan dengan memanfaatkan sumber energi sinar surya, dengan tujuan melakukan transisi energi berbasis fosil ke energi ramah lingkungan dan mengacu pada Peraturan Presiden No 63 tahun 2022 tentang Perincian Rencana Induk Ibu Kota Nusantara.

Teknologi sel surya dari jenis perovskite memiliki keunggulan dibandingkan jenis sel surya lainnya dengan kemampuan PCE hingga 35% (Zhao et al. 2022), sehingga jumlah panel surya dan luas lahan PLTS akan berkurang untuk memasok energi listrik skala besar kebutuhan bahan bakar hidrogen metode PEMWE untuk memproduksi hidrogen.

Kendaraan berbasis *FCEV* berbahan bakar hidrogen akan menjadi mudah mendapatkan hidrogen yang tersedia di stasiun pengisian bahan bakar hidrogen hasil produksi dari PEMWE. Saat ini di Indonesia kendaraan berbasis *Battery Electrical Vehicle* (BEV) sudah mulai dikembangkan yang merupakan salah satu alternatif transisi energi untuk mengurangi konsumsi bahan bakar fosil untuk menurunkan CO₂, namun terkendala diantaranya terbatasnya jumlah stasiun pengisian bahan bakar listrik, masa pakai baterai relative tidak terlalu lama juga kandungan metal dan mineral dalam baterai berpotensi merusak lingkungan karena mengandung racun (Xia et al. 2022). *FCEV* memiliki keunggulan lebih cepat dalam pengisian bahan bakar kurang dari 5 menit dibandingkan BEV.

Konsep utama hidrogen hijau ini bertujuan:

1. Memahami dan merancang PEMWE didukung sel surya berbasis teknologi efisiensi konversi daya (PCE) untuk memproduksi hidrogen.
2. Mengevaluasi pengaruh temperatur dan densitas arus terhadap laju produksi hidrogen dan efisiensi sistem

3. Menghitung potensi reduksi emisi CO₂, melalui pemanfaatan hidrogen sebagai bahan bakar kendaraan berbasis FCEV di IKN.
4. Melakukan analisa keekonomian dengan menggunakan indikator finansial seperti LCOH, CRF, Capex, Opex dan WACC untuk menilai kelayakan untuk dilanjutkan atau penelitian lanjut

I.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa target yang ingin dicapai:

1. Bermanfaat sebagai referensi informasi dan pengetahuan dasar terkait teknologi memproduksi hidrogen hijau metode PEMWE dengan memanfaatkan sumber energi radiasi photovoltaik.
2. Teknologi membran penukar proton sebagai basis referensi pada proses pemisahan hidrogen dan oksigen secara maksimal dari sumber air.
3. Referensi teknologi baru sel surya memiliki tingkat konversi energi tinggi kunci utama pada pembangkit listrik tenaga surya.
4. Bermanfaat bagi para pelaku usaha baik pemerintah maupun swasta untuk mengembangkan hidrogen hijau ini di Indonesia khususnya di IKN Penajam Kalimantan Timur dan hidrogen hasil produksi diharapkan dapat memenuhi kebutuhan kendaraan transportasi FCEV di IKN secara berkelanjutan. Mendukung Upaya pengurangan emisi CO₂ dan pencapaian target Net Zero Emission 2060

I.5 Originalitas Penelitian

Tabel 1. 5 Ringkasan penelitian terdahulu

No	Penelitian (tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
1	J Windarta, S	<i>Technical and</i>	off-grid solar	Rekayasa
	Handoko, T	<i>economic</i>	power plant	teknis
	Sukmadi, K N	<i>feasibility</i>	option	ekonomis off-

No	Penelitian (tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
	Irfani, S M Masfuha, C H, Itsnareno (2021).	<i>analysis of solar power plant design with off grid system for remote area MSME in Semarang City</i>	was the most profitable than generators or battery power sources with State Electricity Enterprise charging.	grid Solar PV skala kecil dibandingkan pembangkit Solar PV di IKN
2	Isabel Mesquita, Luísa Andrade, Adélio Mendes (2023)	<i>A review on the engineering of hole-transporting materials for perovskite solar cells with high efficiency and high stability</i>	Merancang hole transport perovskite dari spiro-OMeTAD, molekul kecil, polimer untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas	Merancang perovskite pada tingkat Voc dan Isc untuk meningkatkan daya listrik optimal menggunakan blok elektronik simulink
3	Hironmoy Karmaker, Ayesha Siddique, Barun K. Das (2023)	<i>Numerical investigation of lead free Cs₂TiBr₆ based perovskite solar cell with optimal selection of electron and</i>	Studi terkait pemanfaatan logam pada sel surya perovskite untuk meningkatkan Efisiensi Konversi Daya	Memiliki perbedaan merancang lapisan sel surya secara tandem (bifacial) dapat meningkatkan

No	Penelitian (tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
		<i>hole transport layer through SCAPS-1D simulation</i>	(PCE) menggunakan variabel ketebalan sel ZnO, CuSbS ₂ dan Cs ₂ TiBr ₆ diperoleh PCE 26,96%	PCE sampai 35%
4	Rashid Iqbal, Yancheng Liu, Yuji Zeng , Qinjin Zhang , Heyang Yu (2023)	<i>Adaptive droop-based SoC balancing control scheme for parallel battery storage system in shipboard DC microgrid</i>	Sistem penyimpanan baterai dilengkapi sistem pengatur pengisian arus listrik (SoC) dan keseimbangan beban	Pengisian arus listrik (SoC) baterai tanpa alat khusus sistem pengatur, pengaturan dilakukan oleh sistem pemograman matlab, fungsi baterai tidak menerima beban
5	Wei Liu, Yanming Wan, Yalin Xiong, Pengbo Gao (2021)	<i>Green hydrogen standard in China: Standard and</i>	Penetapan standar mutu sistem evaluasi hidrogen hijau, factor kunci	Perbedaan pada referensi standar kemurnian hidrogen hijau

No	Penelitian (tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
		<i>evaluation of low-carbon hydrogen, clean hydrogen, and renewable hydrogen</i>	produksi H ₂ , H ₂ rendah karbon, H ₂ bersih dan H ₂ terbarukan dengan metode pendekatan di China	pada ISO 146887-2
6	Pierluigi Guerrieroa, Pietro Tricolib, Santolo Dalientoa (2019)	<i>A bypass circuit for avoiding the hot spot in PV modules</i>	Merancang sirkuit listrik sistem operasi bypass memanfaatkan alat mosfet dan diode untuk menstabilkan arus listrik akibat dari terjadinya spot panas pada permukaan sel	Merancang sirkuit listrik sistem operasi dengan memanfaatkan alat blok elektronik MOSFET (<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i>) berfungsi penyeimbang tegangan dan mengatur aliran arus listrik dan dioda sebagai

No	Penelitian (tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
				penyearah arus listrik
7	Dinko Brezak, Ankica Kova, Mihajlo Firak (2022)	<i>MATLAB/Simulink simulation of low-pressure PEM electrolyzer stack</i>	Merancang model membrane penukar proton elektrolisa air memproduksi hidrogen menggunakan perangkat lunak matlab-simulink penekanan pada kinerja dan potensi kesalahan	Perbedaan merancang model pada fungsi perangkat lunak matlab-simulink-simscape untuk melakukan simulasi dan dirancang kapasitas produksi skala kecil
8	Maximilian Mockl, Maximilian Bernt, Jonas Schröter, Andreas Jossen (2020)	<i>Proton exchange membrane water electrolysis at high current densities: Investigation of thermal limitations</i>	Merancang model perpindahan panas dalam sel bejana bertekanan dan menggunakan sirkulasi air di anoda sebagai sistem	Perbedaan konsep merancang: 1. keseimbangan distribusi air agar sel tidak kelebihan air atau kering, kelembaban membrane

No	Penelitian (tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
			pendingin, laju aliran air 25 ml / (min cm ²)	penukar proton diatur agar proses pemisahan molekul air (H₂O) menjadi H₂ optimal. 2. Optimalisasi temperatur agar struktur membran penukar proton tetap stabil dan meningkatkan konduktivitas proton. 3. Keseimbangan keluar - masuk aliran massa dan panas yang dihasilkan - dikonsumsi sistem

No	Penelitian (tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
9	Ibrahim Dincer, Nader Javani, G. Kubilay Karayel (2022)	<i>Sustainable city concept based on green hydrogen energy</i>	Merancang model hidrogen hijau pada ibukota Istanbul yang sudah berkembang	Perbedaan merancang model pada ibu kota(IKN) tahap awal pengembangan
10	Haeseong Shin, Dohyung Jang, Sangdon Lee, Hyun Seok Cho, Kyong Hwan Kim (2023)	<i>Techno-economic evaluation of green hydrogen production with low-temperature water electrolysis technologies directly coupled with renewable power sources</i>	Faktor kapasitas energi terbarukan dipengaruhi oleh nilai LCOH, Capex dan Opex	Perbedaan LCOH akan dipengaruhi peraturan di wilayah IKN serta kondisi ekonomi

Gap penelitian mengacu beberapa aspek utama yaitu:

1. Tingkat emisi CO₂ dan jumlah unit kendaraan mengacu pada ibu kota Jakarta yang disesuaikan kondisi di IKN pada tahun 2045
2. Perencanaan hidrogen hijau mengacu pada PP No.22 tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup serta Peraturan Presiden no 63 tahun 2022 tentang Perincian Rencana Induk Ibu Kota Nusantara