



LAPORAN PENELITIAN OPSI

Judul Laporan Penelitian
HYGREED (*Green Hydrogen Electrode*): SINTESIS ELEKTRODA
BERBASIS NANO KOMPOSIT LIMBAH KULIT RAMBUTAN
DAN SEKAM PADI UNTUK OPTIMALISASI PRODUKSI HIDROGEN
HIJAU MELALUI ELEKTROLISIS AIR

Tim Peneliti: Hamba Allah
NISA AZZAHRA SURYA PUTRI
ALBA LUNARRONA SUPARMAN

Bidang dan Sub Bidang Kompetisi Penelitian
FTR dan Energi, Penyimpanan, dan Elektronika Daya

MAN 1 Blitar
Kabupaten Blitar, Jawa Timur
2026

ABSTRAK

Rendahnya emisi karbon yang dihasilkan, membuat hidrogen hijau menjadi salah satu upaya dalam pemenuhan kebutuhan energi dunia yang semakin meningkat. Sangat disayangkan, produksinya harus terkendala, khususnya pada biaya pembuatan elektroda dan pengoperasian sistemnya. Menanggapi celah tersebut, penulis mengusulkan "Hygreed", produk elektroda berbahan karbon sekam padi dan kulit rambutan yang telah dikarbonisasi bertahap pada suhu 700 dan 800°C, diaktivasi oleh larutan KOH 2 M, dinetralkan, dikeringkan pada suhu 100°C selama 3 jam, disisipi nano partikel Fe_2O_3 kemudian dicetak dengan binder PVA sebagai solusi masalah yang ada. Dibuat 3 elektroda dengan komposisi berbeda, diantaranya: 1) Kontrol 1,7 gr: 0,3 gr (tanpa Fe_2O_3), 2) VI 0,51 gr: 1,19 gr: 0,3 gr Fe_2O_3 (karbon biomassa sedikit), 3) VII 1,19 gr: 0,51 gr: 0,3 gr Fe_2O_3 (karbon biomassa banyak). Pada uji FTIR, ketiga elektroda menunjukkan adanya gugus fungsi organik $\text{C}\equiv\text{C}$, $\text{C}-\text{O}$, dan $\text{C}-\text{H}$. Namun, munculnya serapan $\text{O}-\text{H}$ yang cukup tajam menandakan proses karbonisasi belum optimal. Sementara pada uji sistem, elektroda melakukan elektrolisis dengan elektrolit berupa HCl 10% dialiri tegangan DC 12 Volt dan dilakukan pendataan dengan waktu 3 menit. Elektroda VII menunjukkan produksi hidrogen hijau yang terbanyak. Karbon dari sekam padi masih mengandung silika, bekerja sama dengan Fe_2O_3 untuk memperbesar hambatan elektroda, menambah panas yang tercipta dan mempercepat proses elektrolisis HCl, sehingga dengan waktu yang sama, terbentuk lebih banyak hidrogen dari elektroda VII.

Kata kunci: Hidrogen hijau, elektroda, sekam padi, kulit rambutan.

Daftar Isi

ABSTRAK	ii
Daftar Isi.....	iii
Daftar Gambar dan Tabel	iv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
A. LATAR BELAKANG	1
B. RUMUSAN MASALAH.....	2
C. TUJUAN PENELITIAN.....	2
D. MANFAAT PENELITIAN	2
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	3
A. LANDASAN TEORI.....	3
B. STUDI PUSTAKA	4
BAB 3. METODE PENELITIAN	5
A. WAKTU DAN TEMPAT PENELITIAN	5
B. ALAT DAN BAHAN.....	5
C. PROSEDUR PENELITIAN	5
D. PENGOLAHAN DATA	7
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	9
A. UJI FTIR.....	9
B. UJI SISTEM SEDERHANA.....	12
C. ANALISIS HUBUNGAN KOMPOSISI DAN PERFORMA.....	13
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	15
A. KESIMPULAN	15
B. SARAN.....	15
DAFTAR PUSTAKA.....	vi
LAMPIRAN.....	viii

Daftar Gambar dan Tabel

Gambar 1. Grafik hasil uji FTIR 3 variasi elektroda.....	9
Gambar 2. Visualisasi Uji Sistem Sederhana.....	12
Tabel 1. Data peak uji FTIR 3 elektroda	10
Tabel 2. Identifikasi gugus fungsi material berdasarkan hasil FTIR.....	10
Tabel 3. Data uji kemampuan hantaran kuat arus dan hambatan elektroda.....	12
Tabel 4. Data produksi hidrogen berdasarkan uji sistem sederhana	12
Tabel 5. Foto variasi elektroda sebelum dan sesudah uji sistem.....	13

BAB 1. PENDAHULUAN

A. LATAR BELAKANG

Ditengah laju pertumbuhan penduduk dan ekspansi industri yang pesat, kebutuhan energi dunia terus melonjak tajam. Ketergantungan pada energi telah membawa konsekuensi serius pada lingkungan. Menurut *International Energy Agency*, sektor energi menyumbang lebih dari 75% total emisi gas rumah kaca dunia, yang salah satunya adalah emisi karbon (Agency 2024). Kondisi ini menunjukkan urgensi untuk mendorong transisi menuju sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan sebagai langkah strategis dalam menjawab tantangan kebutuhan energi jangka panjang, menekan dampak kerusakan lingkungan, sekaligus mengurangi ketergantungan pada sumber daya yang terbatas. Salah satu alternatif energi bersih yang menjanjikan adalah hidrogen hijau (*green hydrogen*), yaitu hidrogen yang diproduksi melalui proses elektrolisis air menggunakan listrik, sehingga emisi karbonnya sangat rendah dan cocok mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih bersih dan berkelanjutan (Aditya et al. 2025). Teknologi ini dinilai berpotensi besar dalam mendukung dekarbonisasi sektor industri dan transportasi berat karena selama proses produksinya menghasilkan emisi karbon yang sangat rendah. Produksi hidrogen hijau melalui elektrolisis merupakan salah satu jalur paling menjanjikan dalam sistem energi berkelanjutan, meskipun masih menghadapi tantangan teknis dan ekonomi (Louli et al. 2026).

Di Indonesia sendiri, potensi pengembangan hidrogen hijau cukup besar. Namun demikian, biaya produksi hidrogen hijau masih relatif tinggi dibandingkan energi berbasis bahan bakar fosil. Laporan *Institute for Essential Service Reform*, menyebutkan bahwa biaya produksi hidrogen hijau di Indonesia masih berkisar antara USD 3,8-12 per kilogram, tergantung pada harga listrik dan teknologi elektroliser yang digunakan (International Energy Agency 2022). Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi teknologi elektrolisis menjadi faktor krusial dalam menekan biaya produksi. Pada proses elektrolisis air, efisiensi sangat dipengaruhi oleh kinetika Reaksi Evolusi Hidrogen (*Hydrogen Evolution Reaction/HER*) di katoda. Nilai *overpotential* yang tinggi menyebabkan kebutuhan energi listrik meningkat sehingga menurunkan efisiensi sistem. Oleh karena itu, rekayasa material elektroda menjadi kunci utama untuk mempercepat transfer muatan dan meningkatkan aktivitas katalik.

Penelitian oleh (Simanullang 2024) melaporkan bahwa jenis material elektroda adalah salah satu faktor yang memengaruhi kinerja dan efisien produksi hidrogen. Sejauh ini, platinum diakui sebagai material dengan performa terbaik, namun harganya yang sangat mahal dan ketersediaannya yang terbatas membuatnya tidak ekonomis untuk skala industri. Keterbatasan biaya dan stabilitas material mendorong perlu adanya inovasi material elektroda yang lebih efisien dan terjangkau. Pendekatan strategis yang ditawarkan dalam penelitian ini adalah penggunaan karbon aktif berbasis limbah biomassa yang dikombinasikan dengan nano partikel. Material karbon yang berasal dari biomassa seperti sekam padi dan kulit rambutan, dianggap sebagai bahan pendukung katalitik yang menjanjikan karena memiliki luas permukaan spesifik, dan porositas yang tinggi, serta kemampuan untuk dimodifikasi, sehingga memungkinkan dispersi fase aktif seperti nano partikel logam efektif (Stepacheva et al., 2023).

Limbah sekam padi dan kulit rambutan dipilih karena mengandung lignoselulosa tinggi yang memungkinkan pembentukan struktur karbon berpori melalui proses karbonisasi dan aktivasi. Karbon berbasis sekam padi telah dilaporkan memiliki luas permukaan tinggi dan berpotensi menjadi material elektroda, sehingga berpeluang dikembangkan lebih lanjut sebagai material pendukung dalam sistem elektrokimia (Huda, Lestari, dan Hidayat 2022). Pemanfaatan sekam padi dan kulit rambutan tidak hanya menjawab permasalahan material murah, tetapi juga mendukung prinsip keberlanjutan melalui pengelolaan limbah pertanian yang melimpah di Indonesia. Selain itu, penambahan nano partikel Fe_2O_3 pada matriks karbon dapat meningkatkan jumlah situs aktif reaksi, mempercepat perpindahan muatan, dan meningkatkan aktivitas katalitik pada reaksi evolusi hidrogen (HER), sehingga berpotensi meningkatkan kinerja elektroda dibandingkan karbon biomassa tanpa modifikasi. Dengan elektroda

yang lebih efisien dan murah, biaya produksi hidrogen hijau dapat ditekan, menjadikan solusi nyata yang mampu mengatasi krisis energi serta mendukung target pengurangan emisi karbon secara global.

B. RUMUSAN MASALAH

1. Bagaimana karakteristik kimia (gugus fungsi) elektroda komposit karbon biomassa Fe_2O_3 berdasarkan hasil analisis karakterisasi menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR)?
2. Bagaimana kemampuan elektrolisis komposit karbon biomassa Fe_2O_3 dalam memfasilitasi reaksi HER (*Hydrogen Evolution Reaction*) berdasarkan pembentukan gas hidrogen pada sistem elektrolisis?

C. TUJUAN PENELITIAN

1. Menganalisis karakteristik gugus fungsi elektroda komposit karbon biomassa Fe_2O_3 menggunakan FTIR sebagai dasar dalam mengidentifikasi karakteristik kimia komposit yang dapat mendukung interpretasi kinerja elektroda pada reaksi HER (*Hydrogen Evolution Reaction*).
2. Mengevaluasi potensi komposit karbon aktif Fe_2O_3 sebagai material katoda pada sistem elektrolisis melalui pengamatan karakter katodik dan pembentukan gas hidrogen.

D. MANFAAT PENELITIAN

Manfaat Teoritis

1. Memberikan informasi ilmiah mengenai hubungan antara karakteristik kimia komposit karbon biomassa Fe_2O_3 dan kemampuannya dalam memfasilitasi reaksi HER (*Hydrogen Evolution Reaction*).
2. Menambah referensi ilmiah mengenai pemanfaatan limbah kulit rambutan dan sekam padi sebagai bahan baku elektroda ramah lingkungan untuk aplikasi elektrolisis air.

Manfaat Praktis

1. Menghasilkan alternatif material elektroda berbasis limbah biomassa yang berpotensi digunakan sebagai katoda pada proses elektrolisis air dengan biaya yang lebih ekonomis.
2. Mendorong pemanfaatan limbah pertanian, khususnya kulit rambutan dan sekam padi, menjadi produk bernilai tambah yang mendukung pengembangan energi hijau dan pengelolaan limbah berkelanjutan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

A. LANDASAN TEORI

1. Hidrogen Hijau

Hidrogen umumnya dikategorikan ke dalam sembilan warna berbeda berdasarkan metode produksinya. Dari kesembilan kategori tersebut, hidrogen hijau adalah pembawa energi bersih yang ideal, ditandai dengan emisi gas rumah kaca yang hampir nol selama produksi dan bahan utama pembuatannya berbasis energi terbarukan berupa air (Zainal et al. 2024). Dalam produksinya, hidrogen hijau tercipta dari proses elektrolisis air menggunakan listrik yang diperoleh dengan sumber energi terbarukan. Dengan demikian, ini dianggap sebagai teknologi penting untuk mencapai pembangunan energi global yang berkelanjutan dengan tujuan “Netral Karbon,” (Tuluhong et al. 2024). Indonesia memiliki potensi besar untuk mengembangkan hidrogen hijau karena ketersediaan energi baru terbarukan (ETB) yang melimpah. Sebuah studi menegaskan bahwa manfaat yang dibawa oleh hidrogen hijau tidak hanya tertuju pada aspek lingkungan, tetapi pengembangan teknologi ini mempunyai manfaat jangka panjang karena dapat menjadi sumber lapangan pekerjaan baru di sektor energi bersih, serta memperkuat komitmen Indonesia dalam mencapai target *net zero emission* (Bonaraja Purba et al. 2025).

2. Elektrolisis Air dan Elektroda

Penjelasan di atas telah menjabarkan tentang proses diciptakannya hidrogen hijau, yaitu melalui elektrolisis air. Elektrolisis air adalah metode yang menggunakan sel elektroda katoda (sebagai elektroda negatif) dan anoda (sebagai elektroda positif) yang dialiri aliran listrik searah (DC), sehingga terjadi penguraian elektrolit. Elektrolit adalah suatu zat yang larut atau terurai ke dalam bentuk ion-ion yang merupakan atom-atom bermuatan elektrik dan merupakan bagian dari senyawa kimia (Zulfany et al. 2024). Arus listrik yang dialirkan pada elektroda mengionisasi molekul air menjadi ion positif yang akan cenderung tertarik ke katoda lalu tereduksi sedangkan ion negatif cenderung tertarik ke anoda lalu teroksidasi (Ramadhan dan Ali 2024). Keefektifan pada proses ini dipengaruhi oleh salah satu bahan elektroda, yaitu karbon yang seharusnya mempunyai luas permukaan spesifik yang tinggi serta konduktivitas listrik yang baik. Ada berbagai macam karbon yang digunakan sebagai bahan elektroda, termasuk karbon aktif (Huda, Lestari, dan Hidayat 2022).

3. Karbon Aktif berbasis Biomassa Kulit Rambut dan Sekam Padi

Karbon aktif adalah karbon yang telah ditingkatkan daya absorpsinya dengan proses aktivasi. Pada proses aktivasi karbon, gas dan air di permukaan karbon dihilangkan. Proses ini menuntun perubahan pada permukaan karbon yang akan terbentuk pori-pori baru. Hal ini disebabkan pengikisan atom karbon karena oksidasi maupun pemanasan (Dewi, Azhari, dan Nofriadi 2020). Karbon aktif adalah bahan karbon dengan struktur amorf (tidak memiliki struktur atom yang teratur yang sering terbentuk melalui pembakaran tidak sempurna) dan luas permukaan internal yang besar dengan tingkat porositas yang tinggi. Karbon aktif memiliki kinerja tinggi dalam konduktivitas listrik, stabilitas termal yang baik, serta reaktif. karbon aktif dikategorikan dalam karbon non-grafit karena memiliki kerapatan rendah, struktur berpori dan dapat diproduksi dari bahan yang mengandung karbon salah satunya dari biomassa (Soonmin dan Kabbashi 2021).

Biomassa seperti kulit rambut dan sekam padi dapat dimanfaatkan menjadi karbon, karena adanya kandungan karbon yang tinggi pada keduanya. Diketahui sekam padi memiliki kandungan kimia yang terdiri atas 50% selulosa, 25-30% lignin, dan 15-20% silika (Huda, Lestari, and Hidayat 2022). Sementara kulit rambut bisa menghasilkan 6,67% selulosa murni (Hutagalung et al. 2023). Kedua biomassa yang dipilih mengandung karbon, karena karbon merupakan penyusun yang membentuk selulosa, hemiselulosa, dan lignin, sehingga keduanya berpotensi untuk dijadikan bahan karbon aktif. Hasil akhir dari karbon aktif berbasis biomassa tersebut disajikan dalam skala nano berdimensi nol

(0-D), yaitu jenis nanomaterial dengan ketiga dimensi (panjang, lebar, dan tinggi) yang berada dalam skala nanometer (Paramita dan Priyono 2024).

4. Kinetika Reaksi HER (*Hydrogen Evolution Reaction*)

Material yang mampu memfasilitasi terjadinya HER harus memiliki karakter katodik. Artinya material secara termodinamika harus mudah mengalami reduksi dan memiliki potensial yang bernilai negatif (Fakhrullah et al. 2019). Bisa atau tidaknya material elektrokatalisis memfasilitasi reaksi tersebut, dapat diperhatikan dari nilai *overpotential*-nya. *Overpotential* adalah selisih antara potensial kerja dan potensial teoritis, karena tidak semua energi digunakan untuk mengaktivasi reaksi, sebagian energi hilang ke lingkungan berupa energi panas. Dengan pernyataan tersebut, maka material elektrokatalis harus mempunyai *overpotential* yang kecil sebagai fasilitator HER. Dalam produksi hidrogen hijau, elektroda berperan sebagai fasilitator HER. Kinetika HER meliputi transfer elektron ganda yang langkah-langkahnya bergantung pada mediumnya yang pada penelitian ini, penulis menggunakan medium asam berupa HCl. Jika medium yang digunakan berupa HCl tentu proses terbentuknya hidrogen menjadi lebih cepat, karena sumber proton H^+ lebih banyak. Dalam HCl, larutan akan langsung terurai menjadi H^+ dan Cl^- . Elektroda akan menangkap ion H^+ yang sudah tersedia bebas di larutan, tidak perlu memecah molekul larutan terlebih dahulu. Akibatnya dibanding dengan menggunakan medium air, dengan arus listrik yang sama akan menghasilkan lebih banyak gas hidrogen (H_2).

B. STUDI PUSTAKA

Berikut ditunjukkan beberapa hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan topik penelitian yang penulis lakukan:

No	Judul Penelitian	Hasil	Referensi
1.	PEMANFAATAN KARBON AKTIF DARI SEKAM PADI SEBAGAI ELEKTRODA SUPERKAPASITOR	Karbon aktif sekam padi menunjukkan kapasitas spesifik tertinggi 8,56 F/g pada elektrolit KOH 2M dan dengan <i>scan rate</i> 25 mV/s.	(Huda, Lestari, dan Hidayat 2022)
2.	PEMANFAATAN BIOMASSA KULIT KAKAO SEBAGAI MATERIAL KARBON AKTIF BERPORI PADA ELEKTRODA SUPERKAPASITOR	Pirolisis menghasilkan karbon aktif berpori dengan struktur dan performa elektrokimia yang dipengaruhi suhu karbonisasi.	(Kurnia, Pangarso, dan Cahyaningsih 2021)
3.	PRODUKSI HIDROGEN DARI AIR LAUT MENGGUNAKAN METODE ELEKTROLISIS BERBANTUAN ELEKTROKATALISIS	Produksi hidrogen dari elektrolisis air laut meningkat dengan penggunaan elektrokatalis karena mempercepat HER dan menurunkan kebutuhan energi.	(Natasha, Hutajulu, dan Pardi 2024)

Berdasarkan uraian tersebut, pemanfaatan karbon aktif berbasis limbah sekam padi dan kulit rambutan yang dikombinasikan dengan nano partikel Fe_2O_3 memiliki potensi untuk menghasilkan material elektroda yang lebih ekonomis dan berkelanjutan bagi produksi hidrogen hijau. Namun, kajian mengenai pengaruh komposisi karbon biomassa dan nano partikel terhadap gugus fungsi komposit elektroda masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji gugus fungsi yang terkandung dalam komposit elektroda menggunakan analisis FTIR serta mengevaluasi karakter elektroda hasil sintesis pada reaksi evolusi hidrogen (HER). Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan alternatif material elektroda berbasis limbah biomassa yang berpotensi mendukung pengembangan teknologi hidrogen hijau yang lebih murah dan ramah lingkungan.

BAB 3. METODE PENELITIAN

A. WAKTU DAN TEMPAT PENELITIAN

Kegiatan penelitian dilakukan pada bulan April sampai dengan bulan Agustus 2026. Rangkaian kegiatan yang akan dilaksanakan meliputi tahap preparasi alat dan bahan, pembuatan elektroda, pengujian elektroda, analisis data hingga penyusunan proposal. Penelitian dilakukan di MAN 1 Blitar dan Laboratorium Mineral dan Material Maju, Universitas Negeri Malang.

B. ALAT DAN BAHAN

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah furnace, timbangan analitik, spatula stainless, crucible alumina, penjepit crucible, cetakan elektroda, *power supply DC*, ayakan 100 mesh, gelas beaker (100 dan 500 ml), dan amplas. Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah kulit rambutan dan sekam padi (sudah dikarbonisasi sebelum furnace guna memenuhi persyaratan dari Lab), larutan KOH 2 M, elektroda kerja/katoda inovasi (karbon aktif + nanopartikel katalis logam oksida (Fe_2O_3)), elektroda kontrol/katoda standar (karbon tanpa nano partikel), dan anoda (*graphite*), aquades, larutan PVA, *black carbon* (carbon conductive), HCl (10%).

C. PROSEDUR PENELITIAN

1. Persiapan Bahan Baku

Limbah kulit rambutan dan sekam padi dicuci menggunakan air mengalir untuk menghilangkan kotoran yang menempel. Bahan kemudian dikeringkan hingga kadar air berkurang, lalu dihaluskan menggunakan blender dan diayak dengan ayakan 100 mesh agar diperoleh ukuran partikel yang lebih seragam (Tamara et al. 2024). Kedua biomassa dicampurkan dengan perbandingan massa 1:1 sebelum memasuki tahap karbonisasi.

2. Karbonisasi Biomassa

Campuran biomassa dimasukkan ke dalam crucible alumina dan dikarbonisasi menggunakan furnace pada suhu 700°C selama 2 jam dengan suplai oksigen yang minim (Yukashima et al. 2025). Setelah proses karbonisasi selesai, sampel didinginkan hingga mencapai suhu ruang untuk memperoleh arang karbon biomassa.

3. Aktivasi Karbon

Karbon hasil karbonisasi direndam dalam larutan KOH 3 M selama 24 jam sebagai proses aktivasi kimia untuk meningkatkan porositas dan luas permukaan material (Yukashima et al. 2025). Setelah proses perendaman selesai, sampel dicuci menggunakan akuades hingga pH filtrat mendekati netral. Sampel kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 100°C selama 3 jam (Huda, Lestari, dan Hidayat 2022). Karbon yang telah kering selanjutnya diaktivasi secara termal menggunakan furnace pada suhu 800°C selama 1 jam. Setelah dingin, karbon aktif dihaluskan kembali dan diayak menggunakan ayakan 100 mesh.

4. Pembuatan larutan PVA (per varian elektroda)

Sebanyak 2 gram PVA dilarutkan ke dalam 20 ml akuades sambil dipanaskan pada suhu $60\text{--}95^\circ\text{C}$ dan diaduk menggunakan batang pengaduk hingga diperoleh larutan bening homogen. Larutan kemudian didinginkan hingga mencapai suhu ruang sebelum digunakan.

5. Penimbangan bahan

Karena penelitian menggunakan beberapa variasi komposisi elektroda, maka setiap bahan ditimbang terlebih dahulu menggunakan timbangan digital sesuai komposisi yang telah ditentukan. bahan yang ditimbang meliputi karbon biomassa hasil karbonisasi aktivasi, nano partikel Fe_2O_3 , *black carbon* sebagai bahan konduktif, dan binder PVA. Penimbangan dilakukan secara teliti untuk memperoleh massa total 2 gram pada setiap variasi elektroda. komposisi tiap elektroda adalah sebagai berikut:

- a. Kontrol: Fe_2O_3 (0 gram), karbon biomassa (1,7 gram), *black carbon* (0,3 gram), dan larutan PVA (2,2 gram).

- b. V1 30%: Fe_2O_3 (0,3 gram), karbon biomassa (0,51 gram), *black carbon* (1,19 gram), dan larutan PVA (2,2 gram).
- c. V2 70%: Fe_2O_3 (0,3 gram), karbon biomassa (1,19 gram), *black carbon* (0,51 gram), dan larutan PVA (2,2 gram).

6. Pembuatan slurry elektroda

Bahan-bahan yang telah disiapkan dan ditimbang sesuai komposisi dicampur dalam 1 wadah dan dilakukan tahap homogenitas sampai bahan benar-benar tercampur menjadi satu. Homogenitas dilakukan dengan mengaduk semua bahan dalam 1 wadah dengan menggunakan batang pengaduk. Setelah homogen ditambahkan sedikit demi sedikit larutan PVA sebanyak komposisi yang sudah ditentukan sampai terus diaduk hingga terbentuk slurry yang homogen dengan konsentrasi seperti pasta dan tidak menggumpal.

7. Pencetakan

Sebelum dilakukan pencetakan, *nickel foam* dipotong dengan ukuran 0,5 x 3 cm, kemudian dibersihkan dengan cara direndam menggunakan aseton, etanol, dan akuades, masing-masing didiamkan selama 10 menit. Kemudian *nickel foam* yang sudah direndam, dioven pada suhu 60°C selama 30 menit untuk mengeringkannya. Setelah *nickel foam* siap, langkah selanjutnya adalah pelapisan slurry ke *nickel foam*. Slurry dioleskan secara merata pada kedua permukaan *nickel foam* menggunakan spatula hingga masuk ke pori-pori substrat. Setelah pelapisan selesai, *nickel foam* dimasukkan ke cetakan hingga cetakan penuh. Selanjutnya, elektroda didiamkan pada suhu ruang selama 24-72 jam sampai permukaan keras, memastikan binder mulai mengikat partikel dan pelarut menguap secara perlahan.

8. Pengeringan

Elektroda dikeringkan menggunakan oven pada suhu 80°C selama 2 jam, kemudian didinginkan hingga mencapai suhu ruang.

9. Karakterisasi dan performa elektroda

a. Karakterisasi FTIR

Karakterisasi material dilakukan menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) sebelum proses fabrikasi elektroda. Sampel analisis berupa serbuk komposit karbon biomassa Fe_2O_3 hasil karbonisasi, aktivasi kimia menggunakan KOH, pencucian hingga pH netral, pengeringan, serta pencampuran homogen dengan Fe_2O_3 tanpa penambahan bahan pengikat (*binder*). Analisis FTIR bertujuan mengidentifikasi gugus fungsi dan ikatan kimia pada material komposit sebagai karakterisasi kimia material hasil sintesis. Pengujian dilakukan sebelum proses fabrikasi elektroda agar karakteristik material aktif dapat dianalisis tanpa dipengaruhi oleh bahan pengikat maupun substrat elektroda. Metode karakterisasi ini mengacu pada penelitian karbon aktif berbasis biomassa sebagai material elektroda yang menggunakan proses FTIR untuk mengidentifikasi gugus fungsi sebelum tahap fabrikasi elektroda (Banbeela et al. 2022).

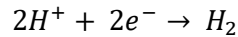
b. Pengujian Sistem Elektroda.

Pengujian aktivitas *Hydrogen Evolution Reaction* (HER) pada material elektrokatalis umumnya dilakukan dalam suatu elektrolit yang memiliki konduktivitas ionik memadai. Kondisi elektrolit asam banyak digunakan dalam penelitian HER karena menyediakan spesies proton (H^+) yang berperan sebagai reaktan dalam pembentukan hidrogen. Wang et al. (2020) melakukan pengujian aktivitas HER menggunakan sistem elektrokimia dengan kondisi asam berupa larutan H_2SO_4 0,5 M. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa material elektrokatalis yang diuji memiliki aktivitas HER yang baik pada kondisi asam dan berpotensi digunakan untuk produksi hidrogen melalui *proses water splitting*.

Berdasarkan penelitian tersebut, penggunaan elektrolit bersifat asam dapat dijadikan salah satu pendekatan dalam pengujian material elektrokatalis untuk HER. Dalam penelitian ini, larutan HCl digunakan sebagai elektrolit asam untuk menyediakan lingkungan yang mendukung berlangsungnya reaksi reduksi proton pada elektroda. Pemilihan HCl merupakan modifikasi terhadap jenis elektrolit

yang digunakan pada penelitian terdahulu, sehingga H_2SO_4 pada penelitian (Wang et al. 2020) digunakan sebagai rujukan mengenai penggunaan media asam dalam pengujian HER, bukan sebagai dasar bahwa HCl merupakan elektrolit yang digunakan oleh penelitian tersebut.

Pada kondisi asam, reaksi HER secara umum dapat dinyatakan sebagai:



Dengan demikian, penggunaan HCl dalam penelitian ini diposisikan sebagai variasi media elektrolit asam yang perlu diuji kesesuaiannya dengan material elektroda yang dikembangkan. Pemilihan tersebut tidak didasarkan pada kesamaan jenis asam dengan penelitian terdahulu, melainkan pada kesamaan prinsip bahwa media elektrolit asam menyediakan proton yang diperlukan dalam reaksi evolusi hidrogen.

Elektroda yang telah dicetak kemudian diuji kemampuannya menghasilkan gas hidrogen. Pengujian tersebut menggunakan rangkaian uji sistem sederhana dengan menaruh elektroda komposit biomassa dan nano partikel sebagai katoda dan elektroda konvensional berbahan *graphite* sebagai anoda pada elektrolit berupa HCl. Elektroda kemudian dialiri listrik dari *power supply* DC. Sebelum arus dihantarkan, elektroda ditutup terlebih dahulu dengan tabung reaksi. Ketika *power supply* DC dinyalakan, elektrolit dalam tabung reaksi akan perlahan surut karena adanya tekanan gas oksigen yang dihasilkan oleh anoda. Begitu pula pada sisi katoda, elektrolit dalam tabung reaksi juga akan berangsur surut karena ada dorongan dari gas hidrogen yang tercipta.

D. PENGOLAHAN DATA

1. Pengolahan Data Uji FTIR (*Fourier Transform Infrared*) - SPEKTRUM

Data uji FTIR disajikan dalam bentuk grafik, kemudian diidentifikasi gugus fungsi yang ada. Hasil identifikasi gugus fungsi disajikan berupa tabel. Data hasil FTIR berupa spektrum hubungan antara bilangan gelombang (cm^{-1}) dan intensitas/absorbansi. Data dianalisis dengan mengidentifikasi pita serapan yang muncul pada spektrum dan mencocokkannya dengan karakteristik gugus fungsi berdasarkan literatur. Hasil identifikasi disajikan dalam bentuk tabel yang memuat gugus fungsi dan interpretasinya. Data yang akan dimasukkan antara lain: gambar spektrum FTIR, peak/bilangan gelombang, gugus fungsi, dan interpretasinya.

2. Pengolahan Data Pengujian Sistem – DOKUMENTASI

Data pengujian sistem elektroda dianalisis secara kuantitatif deskriptif berdasarkan pengamatan pembentukan gas pada sisi katoda dan anoda. Hasil pengamatan dibandingkan antarvariasi elektroda untuk mengetahui perbedaan kemampuan masing-masing komposisi dalam mendukung proses elektrolisis. Sebelum elektroda dipasang pada alat uji sistem sederhana, akan dilakukan pengukuran hambatan yang diciptakan tiap elektroda menggunakan hukum Ohm. Elektroda disambungkan dengan *power supply* DC dengan memberikan tegangan tertentu. Sisi lain elektroda akan disambungkan ke amperemeter. Hambatan diperoleh dari pembagian kuat arus listrik yang tersalur dan tegangan tercipta yang akan dihitung dengan formulasi sebagai berikut:

- a) Menghitung kuat arus listrik dengan amperemeter:

$$\frac{\text{Skala yang ditunjuk jarum}}{\text{Skala maksimum}} \times \text{Batas ukur}$$

- b) Menghitung hambatan dari tegangan dan kuat arus (Hukum Ohm):

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{dengan R: hambatan (Ohm: } \Omega \text{), V: tegangan (Volt: V), dan I: kuat arus listrik (Ampere: A)}$$

Data yang akan dimasukkan antara lain: variasi elektroda, waktu pengujian, terbentuk atau tidaknya gas, volume gas terukur, dokumentasi hasil pengujian, dan perbandingan antarvariasi.

3. Analisis Hubungan Komposisi dan Performa - ANALISIS

Analisis hubungan komposisi dan performa dilakukan dengan membandingkan komposisi karbon biomassa, nano partikel Fe_2O_3 , *black carbon*, dan larutan PVA sebagai binder pada setiap variasi dengan hasil pengujian sistem elektroda. Analisis dilakukan untuk mengetahui kecenderungan pengaruh perubahan komposisi terhadap kemampuan elektroda dalam mendukung pembentukan gas hidrogen.

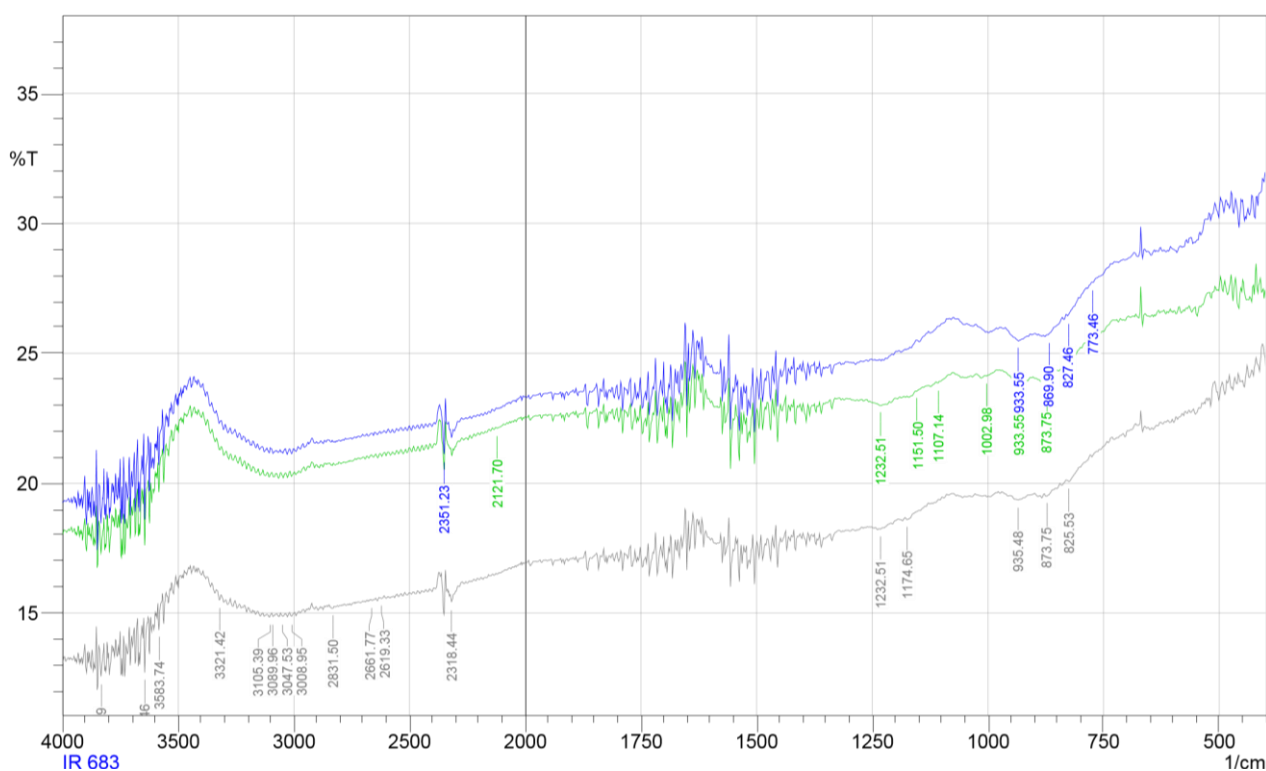
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. UJI FTIR

FTIR dipilih sebagai alternatif, karena alat uji XRD (*X-Ray Diffraction*) pada lab sedang dalam masa *maintenance* hingga waktu yang tidak dapat ditentukan. Dari pilihan lain, FTIR memiliki nilai unggul, karena dengan mengetahui gugus fungsi yang ada dalam sampel, penulis dapat menyimpulkan apakah keberadaan bahan tersebut dapat memengaruhi elektroda atau tidak. Uji FTIR dilakukan dengan mesin FTIR. Sebanyak 0,5 gram bubuk sampel dimasukkan ke dalam wadah sampel (*holder sample*) dan dipasang dalam interferometer. Kemudian sinar inframerah akan ditembakkan melewati celah. Celah berfungsi sebagai pengontrol jumlah energi yang akan diteruskan ke sampel. Sinar inframerah akan dimasukkan melalui celah untuk mengontrol energi, kemudian masuk ke interferometer yang di dalamnya terdapat *beam splitter* yang akan membagi sinar menjadi dua jalur berbeda fase. Beberapa sinar inframerah akan diserap oleh sampel, dan sebagian lagi akan diteruskan. Sinar inframerah yang masuk ke detektor akan mengirimkan sinyal yang terukur ke komputer dan direkam, kemudian akan diproses menjadi angka berupa persen ataupun bilangan gelombang. Hasil uji FTIR akan digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsional (Andaru 2023).

1. Grafik Hasil Pengujian FTIR

Gambar 1. Grafik hasil uji FTIR 3 variasi elektroda



Keterangan: -Abu-abu: Kontrol

-Hijau : VI

-Biru : VII

Tabel 1. Data peak uji FTIR 3 elektroda

Peak (cm ⁻¹)		
Kontrol	VI	VII
		773.46
		827.46
825.53		869.90

Peak (cm ⁻¹)		
Kontrol	VI	VII
873.75	873.75	
	933.55	933.55
935.48		
	1002.98	
	1107.14	
	1151.50	
1174.65		
1232.51	1232.51	
	2121.70	
2318.44		
	2351.23	
2619.33		
2661.77		
2831.50		
3008.95		
3047.53		
3089.96		
3105.39		
3321.42		
3583.74		

2. Tabel Identifikasi Gugus Fungsi

Hasil uji FTIR menunjukkan serapan inframerah pada berbagai rentang bilangan. Interpretasi dilakukan dengan mencocokkan bilangan gelombang serapan yang terdeteksi terhadap pustaka gugus inframerah.

Tabel 2. Identifikasi gugus fungsi material berdasarkan hasil FTIR

Rentang (cm ⁻¹)	Bilangan Gelombang Terdeteksi	Interpretasi Gugus Fungsi
3500-3600	3583.74	O-H (alkohol fenolik) bebas atau N-H (amina primer).
3300-3400	3321.42	N-H (amina sekunder) atau O-H yang berikatan hidrogen. Intensitasnya sedang.
3000-3100	3008.95, 3047.53, 3089.96, 3105.39	C-H aromatik (sp ²). Kehadiran beberapa puncak di atas 3000 cm ⁻¹ memastikan adanya cincin benzena.
2800-2900	2831.50	C-H alifatik (sp ³). Menandakan adanya gugus metil (CH ₃) atau metilen (CH ₂) yang terikat pada aromatik atau atom elektronegatif.
2600-2700	2619.33, 2661.77	Biasanya merupakan kombinasi/ <i>overtone</i> dari puncak C=O (asam karboksilat), tetapi karena tidak ada puncak C=O kuat di ~1700, puncak ini kemungkinan adalah gugus S-H (tiol) atau <i>overtone</i> cincin aromatic.
	2318.44 (Kontrol)	Kemungkinan C≡N (nitril) atau N=C=O (isosionat). Namun, area ini seringkali terganggu oleh CO ₂ .
2600-2900	2121.70 (VI)	C≡C (alkuna) simetris atau C≡N (nitril). Puncak ini adalah indikasi adanya ikatan rangkap tiga karbon-karbon atau nitril alifatik.

Rentang (cm^{-1})	Bilangan Gelombang Terdeteksi	Interpretasi Gugus Fungsi
1100-1250	2351.23 (VII)	Menandakan serapan simetris CO_2 di udara. Nilai <i>Corr. Intensity</i> (2.08) yang tinggi untuk puncak ini menandakan latar belakang tidak dikurangi sempurna.
	1107.14, 1151.50, 1174.65, 1232.51	C-O-C (eter/ester) atau C-N (amina). Puncak 1232.51 dan 1174.65 sangat khas untuk gugus eter aromatik.
1000	1002.98	C-O alkohol atau C-H <i>in plane bending</i> dari cincin aromatik.
750-950	773.46, 825.53, 827.46,	C-H <i>out of plane bending</i> (aromatik). Pola puncak di rentang ini sangat khas untuk menentukan substansi cincin benzena.
	869.90, 873.75, 933.55, 935.48	Adanya puncak di ~ 825 dan ~ 873 menunjukkan adanya substituen 1,2,3 trisubstitusi atau 1,2,4 trisubstitusi pada cincin benzena.

1. Jumlah dan Sebaran Puncak

Sampel Kontrol menunjukkan jumlah puncak serapan terbanyak, yaitu 17 puncak yang tersebar pada rentang $750\text{--}3800\text{ cm}^{-1}$, yang mengindikasikan bahwa material tersebut masih mengandung banyak gugus fungsi residual, meliputi gugus O-H, C-H alifatik, C-H aromatik, dan *overtone* C=O. Sebaliknya, sampel VI (7 puncak) dan VII (5 puncak) menunjukkan jumlah puncak yang jauh lebih sedikit dan terkonsentrasi pada rentang bilangan gelombang menengah hingga rendah ($2400\text{--}750\text{ cm}^{-1}$). Temuan ini menunjukkan bahwa penambahan Fe_2O_3 pada proses pembentukan komposit menyebabkan struktur material menjadi relatif lebih bersih dari gugus fungsi oksigen residual (O-H, C=O) dibandingkan dengan Kontrol. Kondisi tersebut diduga disebabkan oleh interaksi Fe_2O_3 dengan permukaan karbon, atau oleh tingkat kesempurnaan proses karbonisasi pada komposit yang relatif lebih tinggi dibandingkan Kontrol.

2. Rentang O-H dan C-H ($3800\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$)

Puncak serapan pada rentang ini hanya teridentifikasi pada sampel Kontrol, yang mengindikasikan bahwa proses karbonisasi pada sampel tersebut belum berlangsung secara optimal, sebagaimana ditunjukkan oleh masih terdeteksinya gugus hidroksil dan gugus C-H alifatik sisa biomassa yang belum terurai sempurna. Sementara itu, sampel VI dan VII tidak menunjukkan puncak serapan pada rentang tersebut, sejalan dengan simpulan penelitian ini bahwa proses karbonisasi pada material komposit relatif lebih optimal.

3. Rentang $2400\text{--}2100\text{ cm}^{-1}$

Rentang ini menunjukkan karakteristik yang paling bervariasi antarsampel. Sampel Kontrol dan VII sama-sama menunjukkan serapan yang diduga berasal dari gangguan CO_2 atmosfer (masing-masing pada 2318.44 dan 2351.23 cm^{-1}), sedangkan sampel VI menunjukkan puncak khas pada 2121.70 cm^{-1} yang diinterpretasikan sebagai indikasi gugus $\text{C}\equiv\text{C}$ atau $\text{C}\equiv\text{N}$. Temuan ini mengindikasikan kemungkinan terbentuknya ikatan rangkap tiga karbon-karbon secara spesifik pada komposisi VI, yang memiliki proporsi karbon biomassa sebesar 30% dengan black carbon yang lebih dominan.

4. Rentang $1250\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$

Puncak serapan pada rentang ini teridentifikasi pada sampel Kontrol dan VI, tetapi tidak teridentifikasi sama sekali pada sampel VII. Mengingat VII merupakan variasi dengan proporsi karbon biomassa tertinggi (70%), tidak terdeteksinya gugus tersebut mengindikasikan bahwa semakin tinggi proporsi karbon biomassa, gugus eter/ester pada permukaan material semakin berkurang atau tertutupi. Kondisi ini diduga disebabkan oleh kandungan silika dari sekam padi yang relatif tinggi pada sampel VII, yang mendominasi permukaan material dan memengaruhi profil serapan gugus organik tersebut.

5. Rentang 950-750 cm^{-1} (C-H aromatik *out of plane*, substitusi cincin benzena)

Rentang ini merupakan satu-satunya rentang yang menunjukkan puncak serapan secara konsisten pada ketiga sampel, yang mengindikasikan bahwa struktur cincin benzena tetap terbentuk pada seluruh variasi komposisi. Meskipun demikian, terdapat perbedaan pola serapan, di mana sampel VII menunjukkan jumlah puncak terbanyak pada rentang ini (4 puncak, yaitu pada 773, 827, 869, dan 933 cm^{-1}), lebih banyak dibandingkan VI (2 puncak) dan Kontrol (3 puncak). Hal ini mengindikasikan pola substitusi cincin aromatik yang lebih kompleks pada sampel VII, sejalan dengan proporsi karbon biomassa dan kandungan silikanya yang paling tinggi.

Semakin tinggi proporsi komposit Fe_2O_3 (VI dan VII) dibandingkan Kontrol, semakin sedikit gugus fungsi oksigen residual (O-H, C=O) yang terdeteksi, menandakan permukaan karbon yang lebih matang. Di antara VI dan VII, VII kehilangan gugus eter namun menunjukkan pola aromatik yang lebih kompleks, sejalan dengan performanya yang menghasilkan volume gas hidrogen terbanyak (9 ml) meski hambatannya paling tinggi (3000 Ω), yang mengindikasikan karakteristik gugus fungsi permukaan turut berkontribusi terhadap performa elektrokimia elektroda.

B. UJI SISTEM SEDERHANA

1. Uji Kemampuan elektroda

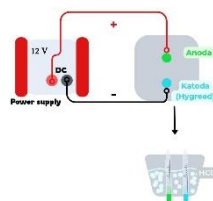
Tabel 3. Data uji kemampuan hantaran kuat arus dan hambatan elektroda

Variasi	Hasil Uji		
	Tegangan (V)	Kuat Arus listrik (I)	Hambatan (R) $\frac{V}{I}$
Kontrol	12 V	0.008 A	1500 Ω
VI		0,005A	2400 Ω
VII		0,004 A	3000 Ω

Keterangan:

- Kontrol: elektroda tanpa nano partikel
- VI : elektroda nano partikel dengan komposisi karbon biomassa 0,51 gr
- VII : elektroda nano partikel dengan komposisi karbon biomassanya 1,19 gr

2. Uji sistem sederhana



Gambar 2. Visualisasi uji sistem sederhana

Tabel 4. Data produksi hidrogen berdasarkan uji sistem sederhana

Variasi	Waktu (menit)	Hasil Uji	
		Hambatan	Produksi Gas Hidrogen (ml)
Kontrol	3	1500 Ω	2 ml
VI		2400 Ω	4 ml
VII		3000 Ω	9 ml

Keadaan elektroda sebelum dan sesudah pengujian produksi gas hidrogen dari uji sistem sederhana sebagai berikut.

Tabel 5. Foto variasi elektroda sebelum dan sesudah uji sistem

Variasi Elektroda					
Kontrol		VI		VII	
					
Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah

C. ANALISIS HUBUNGAN KOMPOSISI DAN PERFORMA

Pengujian sistem dilakukan dengan pencatatan data pada waktu pengujian selama 3 menit. Pembatasan waktu pengujian dilakukan karena setelah waktu tersebut mulai terlihat kerusakan pada elektroda berupa terlepasnya sebagian material karbon dari permukaan elektroda. Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan karakteristik elektroda yang belum melalui proses pengepresan serta penggunaan binder berupa larutan PVA yang menyebabkan ikatan antarpartikel belum cukup kuat. Oleh karena itu, analisis performa elektroda dilakukan berdasarkan kondisi selama 3 menit pertama pengujian, ketika bentuk elektroda masih dapat diamati dengan baik.

Berdasarkan hasil pengujian, elektroda VI dan VII menunjukkan perbedaan kondisi fisik dan pembentukan gas hidrogen dibandingkan dengan elektroda kontrol. Untuk mengetahui faktor yang berkaitan dengan perbedaan performa tersebut, analisis difokuskan pada dua variabel komposisi, yaitu keberadaan Fe_2O_3 sebagai nanopartikel oksida logam dan perbedaan komposisi karbon biomassa.

1. Pengaruh penambahan Fe_2O_3 terhadap performa elektroda

Elektroda kontrol digunakan sebagai pembanding terhadap variasi VI dan VII yang mengandung Fe_2O_3 . Berdasarkan hasil pengujian sistem, diperoleh data berupa elektroda kontrol merupakan variasi dengan kerusakan fisik terkecil dan memiliki hambatan terkecil diantara elektroda lainnya. Pada elektroda kontrol, pembentukan gas yang diamati selama 3 menit sebesar 2 ml, sedangkan pada variasi VI sebesar 4 ml dan variasi VII sebesar 9 ml.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa keberadaan Fe_2O_3 dalam komposit menghasilkan perbedaan respons elektroda pada sistem elektrolisis. Hal ini disebabkan oleh sifat semi isolator Fe_2O_3 yang meningkatkan hambatan pada elektroda tersebut dan berperan dalam kerusakan elektroda (Maryani 2012). Kerusakan elektroda dipengaruhi oleh besarnya hambatan, jika hambatan makin besar, atom-atom bahan akan bergerak tidak teratur dan menimbulkan panas yang lama kelamaan merusak elektroda (Julianto dan Supriyadi 2013). Namun, karena penelitian ini tidak menggunakan metode elektrokimia seperti LSV atau Tafel, pengaruh Fe_2O_3 terhadap aktivitas elektrokatalitik tidak dapat dinyatakan secara kuantitatif berdasarkan nilai *overpotential* atau Tafel slope. Oleh karena itu, hasil penelitian digunakan untuk menunjukkan perbedaan performa elektroda berdasarkan parameter yang diamati dalam sistem pengujian.

2. Pengaruh perbedaan komposisi karbon biomassa terhadap performa elektroda

Variasi VI dan VII memiliki jumlah Fe_2O_3 dan PVA yang sama, sehingga perbedaan utama kedua variasi terletak pada komposisi karbon biomassa dan *black carbon*. VI menggunakan karbon biomassa sebesar 0,51 gram atau 30% dari total komposisi karbon, sedangkan VII menggunakan karbon biomassa sebesar 1,19 gram atau 70%. Sebaliknya, jumlah *black carbon* pada VI lebih tinggi dibandingkan VII. Sekam padi sebagai salah satu sumber karbon biomassa memiliki kandungan silika (SiO_2) yang cukup tinggi. Pada sekam padi mentah, kandungan SiO_2 umumnya berkisar 15–20% dari berat kering, sedangkan setelah proses karbonisasi atau pembakaran, konsentrasi silika dapat meningkat hingga sekitar 52% pada arang sekam dan 85–98% pada abu sekam padi (Kusuma 2019). Kandungan silika tersebut perlu diperhatikan karena silika memiliki sifat yang relatif buruk dalam menghantarkan listrik sehingga keberadaannya dapat memengaruhi hambatan listrik elektroda. Berdasarkan hasil pengujian sistem, variasi VI menunjukkan adanya tanda kerusakan pada elektroda lebih cepat, yaitu

mulai terdapat tanda kerusakan pada menit ke-1 menuju menit ke-2, sedangkan variasi VII menunjukkan kerusakan pada elektroda lebih lambat, yaitu pada menit ke-2 menuju menit ke-3. Selama pengujian, VII juga menunjukkan kondisi fisik elektroda yang lebih kokoh dibandingkan VI, dengan kondisi setelah pengujian berupa area karbon yang menempel pada *nickel foam* lebih luas. Pembentukan gas pada VII teramati lebih banyak dibandingkan VI, yaitu sebesar 4 ml pada VI dan 9 ml pada VII.

Perbedaan tersebut menunjukkan adanya kecenderungan hubungan antara peningkatan proporsi karbon biomassa dengan performa elektroda pada sistem yang digunakan. Peningkatan karbon biomassa dari 30% pada VI menjadi 70% pada VII diikuti oleh perbedaan kondisi fisik elektroda dan volume gas yang terbentuk selama pengujian. Dengan demikian, berdasarkan pengujian sistem yang dilakukan, variasi VII menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan VI berdasarkan ketahanan fisik elektroda dan volume gas yang terbentuk. Namun, hasil tersebut belum cukup untuk menyatakan bahwa peningkatan karbon biomassa secara langsung menyebabkan peningkatan aktivitas elektrokatalitik, karena VI dan VII juga memiliki perbedaan jumlah *black carbon*.

3. Hubungan Karakteristik Kimia Material dengan Performa Elektroda

Karakteristik kimia material dianalisis menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) pada sampel dalam bentuk bubuk sebelum proses fabrikasi elektroda. Analisis FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada material komposit karbon biomassa dan Fe_2O_3 . Hasil analisis FTIR berupa spektrum dengan sejumlah puncak serapan pada bilangan gelombang tertentu yang selanjutnya digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik kimia material.

Berdasarkan hasil *peak picking*, sampel kontrol menunjukkan 17 puncak pada bilangan gelombang 825.53, 873.75, 935.48, 1174.65, 1232.51, 2318.44, 2619.33, 2661.77, 2831.50, 3008.95, 3047.53, 3089.96, 3105.39, 3321.42, 3583.74, 3645.46, dan 3834.49 cm^{-1} . Sampel variasi VI menunjukkan 7 puncak pada 873.75, 933.55, 1002.98, 1107.14, 1151.50, 1232.51, dan 2121.70 cm^{-1} . Sementara itu, sampel variasi VII menunjukkan 5 puncak pada 773.46, 827.46, 869.90, 933.55, dan 2351.23 cm^{-1} .

Perbedaan jumlah dan posisi puncak tersebut menunjukkan adanya perbedaan karakteristik kimia pada masing-masing sampel. Sampel kontrol memiliki jumlah puncak paling banyak, yaitu 17 puncak, sedangkan VI memiliki 7 puncak dan VII memiliki 5 puncak. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan komposisi material menghasilkan perbedaan karakteristik kimia yang dapat diamati melalui spektrum FTIR.

Berdasarkan hasil pengujian sistem, variasi VII menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan VI berdasarkan volume gas yang terbentuk, yaitu 9 ml pada VII dan 4 ml pada VI, serta kerusakan elektroda yang terjadi lebih lambat pada VII. Hasil FTIR menunjukkan adanya perbedaan karakteristik kimia antara ketiga sampel. Dengan demikian, karakterisasi FTIR digunakan untuk memberikan informasi mengenai karakteristik kimia material, sedangkan performa elektroda dinilai berdasarkan hasil pengujian sistem. Perbedaan karakteristik kimia tersebut selanjutnya dapat digunakan sebagai data pendukung dalam menganalisis hubungan antara komposisi material dan performa elektroda.

Berdasarkan hasil uji FTIR, ketiga variasi elektroda menunjukkan keberadaan gugus fungsi C-H aromatik, C-O, dan $\text{C}\equiv\text{C}$ yang menandakan adanya struktur karbon organik yang masih dominan dan berpotensi memberikan konduktivitas serta kapasitansi yang baik sebagai material elektroda superkapasitor. Penambahan Fe_2O_3 pada VI dan VII memberikan kontribusi melalui puncak Fe-O, meskipun menurunkan intensitas gugus organik. Perbedaan komposisi biomassa antara VI dan VII memengaruhi intensitas gugus C-H dan C-O, di mana VII dengan biomassa lebih banyak menunjukkan karakteristik karbon organik yang lebih tinggi. Keberadaan gugus O-H yang masih terdeteksi menunjukkan proses karbonisasi belum sempurna. Secara keseluruhan, ketiga variasi elektroda memiliki potensi yang baik sebagai material elektroda superkapasitor, dengan VII 70% sebagai komposisi paling optimal karena dominasi karbon organik dan keberadaan Fe_2O_3 .

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, penulis menyimpulkan bahwa elektroda karbon berbasis sekam padi dan kulit rambutan dengan penambahan nano partikel Fe_2O_3 telah berhasil dibuat sebagai langkah awal pengembangan energi hidrogen hijau. Hasil uji FTIR menunjukkan masih adanya gugus fungsi yang tidak diharapkan, menjadi penanda bahwa proses fabrikasinya masih perlu di optimalkan dan perlu penyempurnaan. Uji sistem sederhana dilakukan dengan eksperimen elektrolisis HCl 10% dialiri tegangan 12 V, elektroda dengan hambatan tertinggi ($2400\ \Omega$) justru menunjukkan produksi hidrogen hijau lebih banyak dibandingkan elektroda lainnya. Hal ini diduga terjadi karena keberadaan Fe_2O_3 yang semi isolator dan silika dari biomassa mampu meningkatkan selektivitas reaksi terhadap hidrogen. Namun elektroda dengan hambatan tinggi memiliki stabilitas fisik yang rendah dan cenderung cepat rusak, sehingga diperlukan optimasi fabrikasi untuk meningkatkan ketahanannya. Secara keseluruhan, pemanfaatan limbah biomassa dan modifikasi Fe_2O_3 menawarkan potensi besar untuk produksi hidrogen hijau, namun memerlukan ketelitian, ketelatenan, dan pengujian bertahap agar diperoleh hasil yang maksimal.

B. SARAN

Penulis menyarankan peneliti selanjutnya untuk memastikan ketersediaan dan kelayakan alat serta bahan penelitian sebelum pelaksanaan. Persiapan yang matang dan menyeluruh seperti melengkapi pengujian dengan analisis elektrokimia, seperti LSV dan Tafel, serta *Faradaic efficiency* untuk memperoleh evaluasi aktivitas, kinetika, dan selektivitas elektroda terhadap HER diharapkan dapat memastikan kelayakan dari penelitian tersebut dan mendukung kelancaran selama proses penelitian hingga penyusunan laporan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, puji dan Syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT, dengan karunia, rahmat serta ridha-Nya, laporan penelitian ini dapat selesai tepat waktu. Penulisan laporan penelitian ini tentunya tidak lepas dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih sebanyak-banyaknya kepada:

1. Balai Pengembangan Talenta Indonesia (BPTI) dibawah naungan Pusat Prestasi Nasional (Puspresnas) yang telah menyelenggarakan *event* OPSI. Terima kasih telah bersedia menjadi wadah bagi generasi muda Indonesia termasuk penulis untuk menuangkan ide-idenya, mengembangkan berbagai inovasi untuk negara Indonesia yang lebih baik kedepannya.
2. Sekolah penulis MAN 1 Blitar yang dalam pembuatan karya ini telah berkontribusi kepada ketersediaan tempat yang nyaman agar penulis bisa mengerjakan karya tulis dengan maksimal.
3. Ibu Khoirum Mawarti selaku pembimbing penulis. Terima kasih atas seluruh dedikasi dan kesabarannya, juga usaha-usaha yang telah ibu keluarkan untuk suksesnya penulisan karya tulis ilmiah ini yang dimulai dari pembuatan judul hingga penyusunan laporan penelitian.
4. FMIPA Universitas Negeri Malang yang telah menyediakan fasilitas penunjang penelitian penulis, khususnya fasilitas di Laboratorium Mineral dan Material Maju (Lab. Sentral). Tanpa ketersediaan kampus, tentunya penelitian tidak bisa berjalan lancar.
5. Keluarga penulis. Terima kasih atas seluruh dukungan yang diberikan, juga seluruh hal-hal terkecil yang selalu diusahakan untuk kelancaran dalam penyusunan laporan penelitian. Tentunya keberhasilan penulis dalam menyusun laporan tidak luput dari seluruh doa-doa yang terpanjat.
6. Diri penulis sendiri, yang pantang menyerah hingga dititik ini, meskipun banyak sekali rintangan yang dihadapi, tugas-tugas yang menumpuk, membagi waktu untuk belajar saat ujian, dan harus meluangkan waktu untuk memikirkan kelanjutan penelitian ini tentu berat, namun penulis masih bisa menyelesaikannya dengan sehat dan bahagia
7. Deretan *support system* penulis, yaitu, Park Jibin, Dex, Ateez, Seventeen, NCT, LNGSHOT, CORTIS, enhypen, RIIZE, dan banyak lainnya yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu. Terima kasih telah menemani hari-hari sulit penulis, membangkitkan semangat disaat penulis ada di titik rendahnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditya, Indra Ardhanayudha, Zulfa Berliana Pratiwi, Dziki Firmansyah Hakam, dan Prodia Nur Kemala. 2025. "Green Hydrogen as a Catalyst for Indonesia's Energy Transition: Challenges, Opportunities, and Policy Frameworks." *International Journal of Energy Economics and Policy* 15(2): 182–94. doi:10.32479/ijeep.17380.
- Agency, International Energy. 2024. International Energy Agency *CO 2 Emissions in 2023*. Paris. www.iea.org.
- Andaru, PT. 2023. "FTIR-Pengertian, Fungsi, dan Prinsip Kerjanya." *andarupm.co.id*. <https://share.google/nshg7H4fJym1tn2yL> (Agustus 5, 2026).
- Banbeela, Hadeel, Laila Alharbi, Reema Al-Dahiri, Mariusz Jaremko, dan Mohamed Salam. 2022. "Preparation, Characterization, and Electrochemical Performance of the Hematite/Oxidized Multi-Walled Carbon Nanotubes Nanocomposite." *Molecules* 27(2708): 1–14. doi:<https://doi.org/10.3390/molecules27092708>.
- Bonaraja Purba, Ainun Saskia, Essi Laura Amanda, Rachel Adeline Siagian, dan Afriyani Elizabet Sitorus. 2025. "Peran Kebijakan Sumber Daya Alam dalam Mewujudkan Transisi Energi berbasis Green Hydrogen di Indonesia." *Jurnal Pengabdian Masyarakat dan Riset Pendidikan* 4(2): 7906–12. doi:<https://doi.org/10.31004/jerkin.v4i2.300>.
- Dewi, Rozanna, Azhari, dan Indra Nofriadi. 2020. "Aktivitas Karbon Dari Kulit Pinang dengan Menggunakan Aktivator KOH." *Jurnal Teknologi Kimia Unimla* 9(2): 12–22. www.ft.unimal.ac.id/jurnal_teknik_kimia.
- Fakhrullah, Fadli, Purwantiningsih Sugita, Mohammad Khotib, dan Takeno Akiyoshi. 2019. "Komposit Polianilina / Kitosan / Perak Nanowires Sebagai Elektrokatalis Reaksi Evolusi Hidrogen dalam Medium Netral." 15(2): 190–202. doi:10.20961/alchemy.15.2.30460.190-202.
- Huda, Aryani Nurul, Indri Lestari, dan Sahrul Hidayat. 2022. "Pemanfaatan Karbon Aktif dari Sekam Padi sebagai Elektroda Superkapasitor." *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika* 06(02): 102–13. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/109033989/39639-151046-1-PB-libre.pdf?1702679998=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DPemanfaatan_Karbon_Aktif_dari_Sekam_Padi.pdf&Expires=1772070048&Signature=ObNwXd01r9esbhu5srYfbx2pr0JZj7MV2CZSC90LJgA.
- Hutagalung, Johannes Martua, Galu Murdikaningrum, Melinda Yulianti, dan Shinta Nurcahyani. 2023. "Potensi Limbah Kulit dan Biji Rambutan (*Nephelium lappaceum* L) sebagai Bioetanol." *Composite: Jurnal Ilmu Pertanian* 5(2): 76–85. doi:10.37577/composite.v5i2.578.
- International Energy Agency. 2022. World Energy Outlook 2022 *IEA World Energy Outlook 2022*. ed. Laura Cozzi, Tim Gould, Edmund Hosker, dan Debra Justus. Paris: International Energy Agency (IEA), Paris, Prancis. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.
- Julianto, Bangun, dan Supriyadi. 2013. "Pengaruh Suhu terhadap Hambatan Rangkaian Listrik." *Jurnal Fisika* 3(2). <https://share.google/UxxHpiX14xFLfSDAG>.
- Kurnia, Kahfi Imam Faqih, Zulkaisi Dwi Pangarso, dan Lina Cahyaningsih. 2021. "Pemanfaatan Biomassa Kulit Kakao sebagai Material Karbon Aktif Berpori pada Elektroda Superkapasitor dengan Metode Pirolisis." 5(1): 34–45. <https://jurnal.ukmpenelitianunyu.id/index.php/jippm/article/download/213/112>.
- Kusuma, Hamdan. 2019. "Sintesis Bahan Silika Berbasis Zeolit dan Abu Sekam Padi." *Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang*: 1–89. <https://share.google/3n373VTZNiDj1nN15>.
- Louli, Rafika, Stefan Giurgea, Issam Salhi, Salah Laghrouche, dan Abdesslem Djerdir. 2026. "A Critical Review of Green Hydrogen Production by Electrolysis: From Technology and Modeling to Performance and Cost." *Energies* 19(1): 1–25. doi:10.3390/en19010059.
- Maryani, Devi. 2012. "Penentuan Efisiensi DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell) yang Dibuat dari Semikonduktor ZnO yang Diamban Fe 3+ Melalui Metode Presipitasi." 15(1): 29–35.
- Natasha, Febiana, Ezra Solafide Hutajulu, dan Hilfi Pardi. 2024. "Produksi Hidrogen Dari Air Laut Menggunakan Metode Elektrolisis Berbantuan Elektrokatalis." *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan* 5(2): 115–29. doi:10.14710/jebt.2024.23562.
- Paramita, Safira Arta, dan Priyono. 2024. "Perkembangan Nanosains dan Nanoteknologi: Fenomena dari Sifat Fisika dan Kimia." *Berkala Fisika* 27(2): 49–57.

- https://ejournal.undip.ac.id/index.php/berkala_fisika/article/view/70086/27578.
- Ramadhan, Muhammad Luthfi, dan Najmi Nur Asyifa Ali. 2024. "Elektrolisis." *Jurnal Ilmu Komputer dan Ilmu Pengetahuan Alam* 2(4): 105–12. doi:<https://doi.org/10.62383/polygon.v2i4.154>.
- Simanullang, Bantu Hotsan. 2024. "Analisis Kinerja Berbagai Jenis Elektroda dalam Proses Elektrolisis untuk Produksi Hidrogen." *Jurnal Ismetek* 18(1): 1–3.
- Soonmin, Ho, dan Nassereldeen A. Kabbashi. 2021. "Review on Activated Carbon: Synthesis, Properties and Applications." *International Journal of Engineering Trends and Technology* 69(9): 124–39. doi:[10.14445/22315381/IJETT-V69I9P216](https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I9P216).
- Stepacheva, Antonina A, Maria E Markova, Yury V Lugovoy, Kosivtsov Yury Yu, Valentina G Matveeva, dan Mikhail G Sulman. 2023. "Plant-Biomass-Derived Carbon Materials as Catalyst Support, A Brief Review." *Catalysts* 13(655): 1–14. doi:<https://doi.org/10.3390/catal13040655>.
- Tamara, Gersom Jeremia, Jeferson Polii, Farly R Tumimomor, Alfrie M Rampengan, dan Satyano W Mongan. 2024. "Karakteristik I-V Elektroda Superkapasitor Berbasis Karbon Aktif Kulit Kacang Batik Kawangkoan." 7(2).
- Tuluhong, Ayiguzhali, Qingpu Chang, Lirong Xie, Zhisen Xu, dan Tengfei Song. 2024. "Current Status of Green Hydrogen Production Technology: A Review." *Sustainability (Switzerland)* 16(20): 1–46. doi:[10.3390/su16209070](https://doi.org/10.3390/su16209070).
- Wang, Fang, Haifeng Yu, Ting Feng, Dan Zhao, Jinhua Piao, dan Jianfei Lei. 2020. "Surface Roughed and Pt-Rich Bimetallic Electrocatalysts for Hydrogen Evolution Reaction." 422(June): 1–9. doi:[10.3389/fchem.2020.00422](https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00422).
- Yukashima, Arinda, Putri Prahesti, Sheilla Rully Anggita, dan Hamdan Hadi Kusuma. 2025. "Effect of Carbonization Temperature on Pore Formation and Adsorption Ability of Coconut Shell Activated Carbon with KOH Activator." 21(3–5).
- Zainal, Bidattul Syirat, Ker Pin Jern, Hassan Mohamed, Hwai Chyuan Ong, I. M.R. Fattah, S. M.Ashrafur Rahman, Long D. Nghiem, dan T. M.Indra Mahlia. 2024. "Corrigendum to Recent Advancement and Assessment of Green Hydrogen Production Technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 202: 2–3. doi:[10.1016/j.rser.2024.114734](https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114734).
- Zulfany, Muhammad Daffa, Erlinawati Erlinawati, Agus Manggala, dan Indah Pratiwi. 2024. "Produksi Gas Hidrogen dengan Proses Elektrolisis Air Laut Ditinjau dari Konsentrasi KOH." *Jurnal Redoks* 9(2): 105–13. doi:<https://doi.org/10.31851/redoks.v9i2.15012>.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Realisasi Rencana Anggaran Biaya

No	Komponen Pengeluaran	Rincian		Jumlah Anggaran
		Jumlah	Harga	
Anggaran Biaya Bahan				
1.	Kulit rambutan & sekam padi	1-2kg/limbah	0	Rp. 0
2.	KOH	20 gr	0	Rp. 0
3.	Elektroda graphite	1	19.940	Rp. 19.940
4.	HCl	500 ml	31.500	Rp. 31.500
5.	Black Karbon	100 gr	30.800	Rp. 30.800
6.	Ayakan 100 mesh	1 buah	67.000	Rp. 67.000
7.	Cetakan elektroda	2 buah	123.012/buah	Rp. 246. 024
8.	Fe2O3	2 g	162.800	Rp. 325.600
9.	PVA	250 gram	91.500	Rp. 91.500
Anggaran Biaya Sewa				
1.	Furnace		200.000	Rp. 200.000
8.	FTIR	3 sampel	200.000/ sampel	Rp. 600.000
Total				Rp. 1.612.364

Lampiran 2. Komentar Reviewer pada Proposal Penelitian dan Respon Peneliti

No.	Komentar Reviewer	Respons Peneliti
1.	Perjelas mekanisme dan tegaskan <i>research gap</i> (minimnya elektroda biomassa dan nano-logam, fokuskan pada kinetika HER dan performa elektroda)	<i>Research gap</i> pada penelitian ini terletak pada masih terbatasnya pengembangan elektroda HER berbasis limbah biomassa lokal yang dikombinasikan dengan nano partikel Fe₂O₃. Sebagian besar penelitian menggunakan karbon komersial atau material logam yang berbasis mahal. Sementara itu, pemanfaatan karbon aktif dari kulit rambutan dan sekam padi sebagai matriks elektroda dengan penambahan Fe₂O₃ untuk meningkatkan jumlah situs aktif reaksi HER masih jarang dilaporkan. Kondisi tersebut, dapat membuka peluang pengembangan elektroda dengan biaya rendah yang berpotensi meningkatkan performa elektrokimia dan mendukung produksi <i>hydrogen</i> hijau secara lebih berkelanjutan. Research gap telah ditegaskan pada masih minimnya pemanfaatan campuran biomassa sebagai bahan baku carbon aktif penyusun elektroda dan penambahan nano partikel oksida logam dalam komposisi elektrodanya.
2.	Sederhanakan fokus desain eksperimen, tambahkan kontrol positif, perjelas feasibility alat.	Penulis telah menambahkan kontrol positif (elektroda biomassa tanpa tambahan nano partikel). Tidak tersedianya alat yang lengkap (LSV, BET) pada lab dan terbatasnya anggaran dana yang teredia, penulis mengupayakan feasibility pengujian, dengan hanya menggunakan FTIR dan uji sistem sederhana.

No.	Komentar Reviewer	Respons Peneliti
3.	Perlu penguatan pada interpretasi, tambahkan parameter utama, evaluasi hubungan (komposisi biomassa vs performa elektroda)	Parameter utama yang ingin dicapai penulis adalah terbentuknya hidrogen pada proses elektrolisis HCl menggunakan elektroda yang telah dibuat. Hubungan yang diperoleh merupakan hubungan antara banyaknya hidrogen yang diproduksi yang berbanding lurus dengan besar habatan elektroda.