

## Peran Kaolin Clay dan Karbon Aktif dalam Produksi Gas Hidrogen dengan Metode Fotokatalisis

Yepy Komaril Sofi'i<sup>1\*</sup>, Sudarman<sup>2</sup>

<sup>1,2)</sup> Program Studi Teknik Mesin/Fakultas Teknik/Universitas Muhammadiyah Malang

Telp. (0341) 464318 pes 128. Fax. (0341) 460782

\*Email: [yepkomarils@umm.ac.id](mailto:yepkomarils@umm.ac.id)

### ABSTRACT

*The energy crisis is a challenge in the industrial sector. Hydrogen is environmentally friendly alternative energy. This study aims to determine the role of kaolin clay and activated carbon in hydrogen production by the photocatalysis method. Hydrogen production was carried out in a closed tube reactor with a total volume of 500 mL filled with 100 mL of pure water and the remainder for air. 300 W halogen lamp was used as the light energy source. The photocatalysis test temperature was maintained at 70°C. The hydrogen gas was measured using the MQ-8 sensor connected to the Arduino Uno atmega 328p microcontroller and a computer. From the results of photocatalysis testing, kaolin clay photocatalyst has a significant role in the production of hydrogen gas. The use of 10 mg of kaolin clay was able to produce hydrogen gas of 81  $\mu\text{mol h}^{-1}$ . This value was the highest when compared to the use of an activated carbon photocatalyst or the combination of kaolin clay with activated carbon. Kaolin clay which has a content of 7.58% silica and a high electron density has an important function for the dissociation of hydrogen and covalent bonds in photocatalysis solutions.*

**Keywords:** Alternative Energy, Hydrogen, Photocatalysis, Activated Carbon, Kaolin Clay

### PENDAHULUAN

Saat ini krisis energi telah menjadi tantangan besar bagi industri [1]. Kebutuhan energi dunia sebagian besar tergantung pada sumber daya yang tidak terbarukan (bahan bakar fosil, batubara, minyak dan lainnya). yang jumlahnya semakin menipis [2]. Pada tahun 2050 energi yang dibutuhkan oleh dunia sekitar dua kali lipat dari pasokan energi saat ini [3]. Sumber energi tak terbarukan juga menjadi sumber utama gas rumah kaca yang merugikan lingkungan [4]. Hidrogen adalah salah satu bentuk energi alternatif yang bersih, dapat disimpan, dan menjanjikan untuk masa depan [5]. Pengembangan berbagai metode untuk menghasilkan hidrogen dari sumber daya terbarukan dan berkelanjutan telah menarik minat para peneliti [6]. Pemisahan air fotokatalisis menggunakan sumber energi cahaya memberikan pilihan yang menjanjikan untuk menghasilkan hidrogen [7]. Secara umum, produksi hidrogen dari proses pemisahan air fotokatalisis dapat diklasifikasikan menjadi pemisahan air fotobiologis, pemisahan air termokimia, dan pemisahan air fotokatalisis [8-10]. Dari ketiga jenis pemisahan air, pemisahan air fotokatalisis merupakan metode yang efektif dan ramah lingkungan [11-13]. Pada penelitian ini metode yang digunakan adalah pemisahan air fotokatalisis. Dalam fotokatalisis diperlukan bahan semikonduktor, bahan hidrokarbon, dan pelarut. Bahan semikonduktor dapat menggunakan bahan yang terbuat dari logam ataupun karbon. Sedangkan bahan hidrokarbon dapat diambil dari material yang mempunyai kandungan utama berupa hidrogen, karbon, dan oksigen. Bahan hidrokarbon yang umum digunakan adalah methanol, ethanol, dan minyak. Adapun pelarut dapat menggunakan fluida cair yang tidak mudah menguap, seperti air suling dan greywater. Saat ini penggunaan bahan fotokatalisis yang ramah lingkungan telah menjadi urgensi dalam penelitian mengenai fotokatalisis. Sehingga metode dan tujuan pada penelitian ini mempunyai kesinambungan dalam menghasilkan gas hidrogen dengan metode yang ramah lingkungan.

Foton dan fotokatalisis merupakan komponen utama dalam reaksi fotokatalisis. Syarat terjadinya fotokatalisis adalah sumber cahaya yang digunakan harus mempunyai band gap energy yang lebih besar dari band gap energy fotokatalisis. Foton dapat berasal dari sumber cahaya alami (cahaya

matahari) ataupun sumber cahaya buatan (lampu). Sedangkan fotokatalis yang umum digunakan adalah berbahan semikonduktor. Dalam fotokatalis semikonduktor, setelah foton dipancarkan ke fotokatalis, elektron akan melompat ke pita konduksi dan lubang akan dihasilkan pada pita valensi. Kemudian mereka transfer elektron ke permukaan fotokatalis untuk reaksi redoks[14]. Pemisahan air terdiri dari dua setengah reaksi. Oksidasi air menghasilkan oksigen dan reduksi air menghasilkan hidrogen seperti yang ditunjukkan pada persamaan 1-3.

Persamaan pemisahan air secara keseluruhan:



Persamaan evolusi oksigen:



Persamaan evolusi hidrogen:

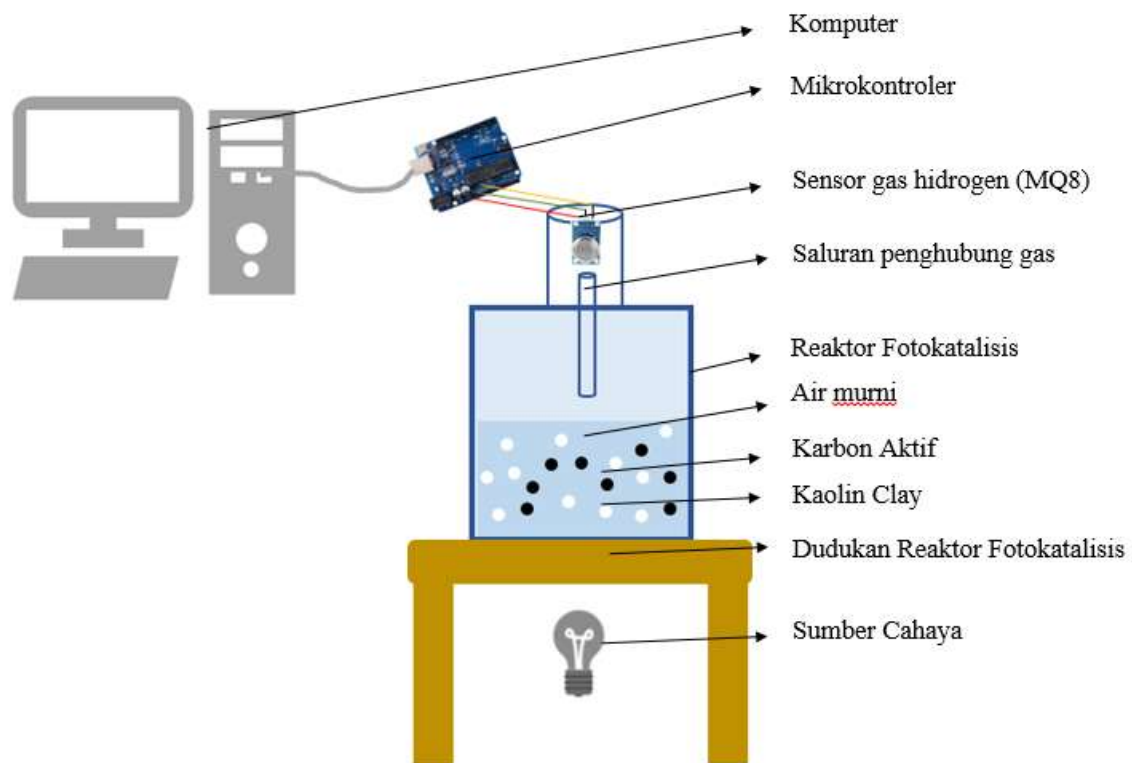


Para peneliti sebelumnya telah mengembangkan berbagai jenis fotokatalis untuk menghasilkan hidrogen dengan metode pemisahan air fotokatalisis. Diantaranya dengan penggunaan bahan semikonduktor berbasis karbon. Donghong et al menggunakan fotokatalis  $\text{C}_3\text{N}_4/\text{Ni-Tu-TETN}$ , pelarut air 70 mL, dan lampu Xe 300W sebagai sumber cahaya. Hidrogen yang dihasilkan sebesar  $51 \mu\text{mol h}^{-1}$  [15]. Xiaosong et al memodifikasi karbon dengan  $\text{Cu}(\text{OH})_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ , pelarut yang dipakai 80 mL methanol dan air dengan perbandingan 1:3, dan sumber cahaya berasal dari lampu Xe 300 W. Kombinasi tersebut mampu menghasilkan hidrogen  $48,7 \mu\text{mol h}^{-1}$ [16]. Guixia et al menggunakan fotokatalis  $\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{rGO}$ , pelarut 100 mL air, dan 250 W iron doped metal halide sebagai sumber cahaya [17]. Karbon mempunyai keunggulan yaitu kestabilan kimia yang baik. Selain itu, fotokatalis paduan karbon cocok digunakan pada panjang gelombang  $\lambda > 420 \text{ nm}$ . Namun fotokatalis karbon memerlukan komposisi yang tepat agar bekerja dengan optimal dalam menghasilkan hidrogen.

Dari hasil penelitian sebelumnya nampak ada kekurangan dalam segi komposisi fotokatalis dan pelarut yang digunakan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, pada penelitian ini akan diteliti lebih lanjut fotokatalis karbon yang dipadukan dengan kaolin clay ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) untuk menghasilkan gas hidrogen secara maksimal dengan metode pemisahan air fotokatalisis. Adapun bahan karbon yang digunakan adalah karbon aktif tempurung kelapa. Pemilihan karbon aktif berdasarkan sifat semikonduktor dan tingkat absorbansinya yang baik. Sedangkan pemilihan kaolin clay berdasarkan kandungan silika (Si) yang cukup baik yaitu sekitar 7,58%. Unsur silika tersebut berfungsi penting dalam reaksi pemutusan ikatan hidrogen pada larutan fotokatalisis.

## METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Malang. Waktu pelaksanaan penelitian Juli 2021- Desember 2021). Gambar 1 menunjukkan instalasi penelitian yang digunakan untuk melakukan pengujian pemisahan air fotokatalisis. Penelitian ini menggunakan karbon aktif dan kaolin clay sebagai fotokatalis.



Gambar 1. Instalasi Penelitian

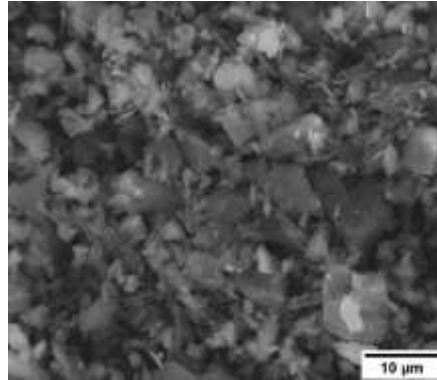
Karbon aktif terbuat dari batok kelapa yang dibeli dari pasar lokal di Malang, Indonesia. Tempurung kelapa dikeringkan di bawah sinar matahari dan dipanaskan dalam tangki pirolisis pada suhu 400 °C selama 4 jam. Arang dari proses pirolisis direndam dalam larutan 25% CaCl selama 15 jam sampai menjadi karbon aktif. Karbon aktif dicuci dengan air sampai kotoran terpisah dan ditiriskan pada temperatur ruang. Kemudian dikeringkan dalam oven pada temperatur 110°C selama 3 jam. Kemudian karbon aktif disaring sampai ukuran 200 mesh.

Kaolin clay dibeli dari pasar lokal di Tangerang Selatan, Indonesia. Kaolin clay dibuat dengan mencampurkan mineral kaolinit dengan air dan bahan lain yang ditambahkan oleh produsen untuk mengubah warna dan tekstur kaolin clay. Dalam bentuk alamnya, kaolinit adalah mineral serbuk dalam ukuran 350 mesh.

Metode penelitian diawali dengan setup alat penelitian seperti Gambar 1. Sumber energi cahaya yang digunakan adalah lampu halogen 300 W dengan panjang gelombang dari 560 nm. Temperatur uji fotokatalisis dipertahankan pada 70 °C. Produksi hidrogen dilakukan dalam reaktor tabung tertutup dengan volume total 500 mL yang diisi dengan 100 mL air murni dan 400 mL untuk udara. Proses fotokatalisis dilakukan selama satu jam. Komposisi fotokatalis dibuat bervariasi untuk mengetahui pengaruhnya terhadap gas hidrogen yang dihasilkan. Jumlah fotokatalis mulai dari 10 mg, 25 mg, dan 50 mg. Terdapat 9 variasi fotokatalis diantaranya, 10 mg karbon aktif, 25 mg karbon aktif, 50 mg karbon aktif, 10 mg kaolin clay, 25 mg kaolin clay, 50 mg kaolin clay, 10 mg karbon aktif+kaolin clay, 25 mg karbon aktif + kaolin clay, dan 50 mg karbon aktif + kaolin clay. Variasi fotokatalis karbon aktif dan kaolin clay tersebut dilarutkan dalam air. Masing-masing variasi fotokatalis dilakukan dalam 5 kali pengujian fotokatalisis dan dirata-rata hasilnya. Gas hidrogen yang dihasilkan diukur menggunakan sensor MQ-8 yang terhubung dengan mikrokontroler Arduino Uno atmega 328p dan komputer. Sensor MQ-8 telah dikalibrasi dengan 99,99% hidrogen murni. Gas hidrogen yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 10.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

## A. Hasil Pengujian Sem Edx

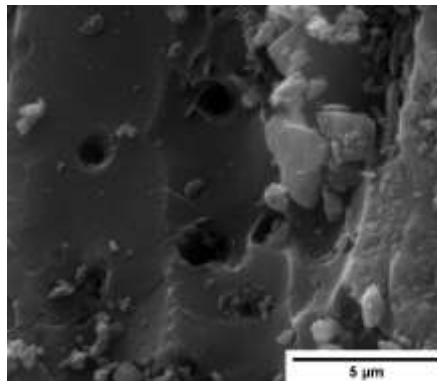


Gambar 2. Hasil pengujian SEM EDX kaolin clay

Tabel 1. Hasil Pengujian EDX Kaolin Clay.

Elemen	Persentase (%)
Karbon	48,34
Oksigen	34,99
Aluminium	09,09
Silika	07,58

Gambar 2 dan Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian SEM EDX kaolin clay dengan perbesaran 5.000x. Kaolin didominasi dengan bentuk serpihan berwarna putih. Bentuk serpihan tersebut mempunyai peran yang penting karena mempunyai luas permukaan kontak yang baik. Kaolin clay mempunyai kandungan karbon 48,34%, oksigen 34,99%, aluminium 9,09%, dan silika 7,58%.



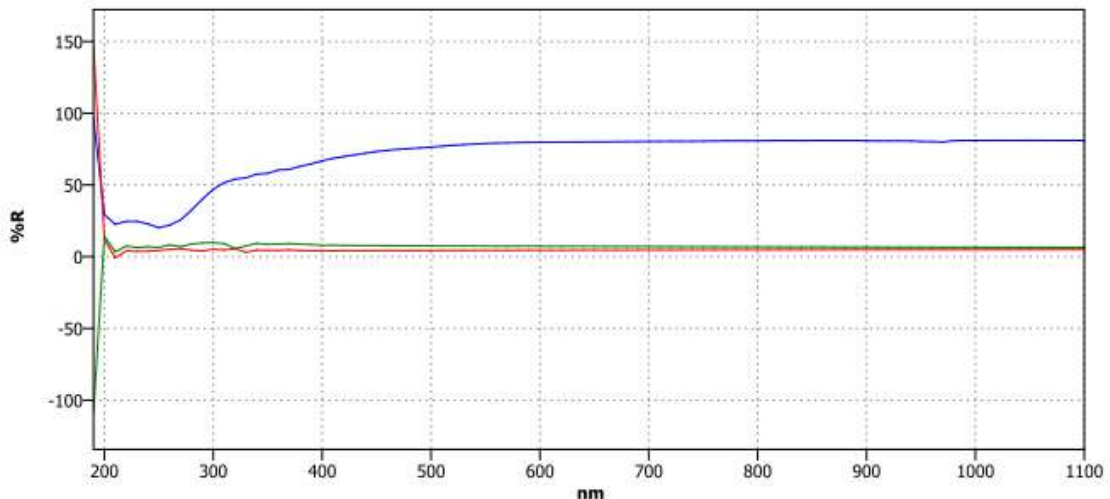
Gambar 3. Hasil pengujian SEM EDX karbon aktif

Tabel 2. Hasil Pengujian EDX Karbon Aktif.

Elemen	Persentase (%)
Karbon	81,15
Oksigen	13,50
Aluminium	01,17
Silika	01,08
Kalium	2,37

Gambar 3 dan Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian SEM EDX karbon aktif dengan perbesaran 20.000x. Karbon aktif mempunyai ciri khas yaitu strukturnya berpori. Pori-pori tersebut mempunyai peran dalam mengadsorpsi unsur karbon dari senyawa lain dan. Karbon aktif mempunyai kandungan karbon 81,15%, oksigen 13,50%, aluminium 1,17%, silika 1,8%, dan kalium 2,37%.

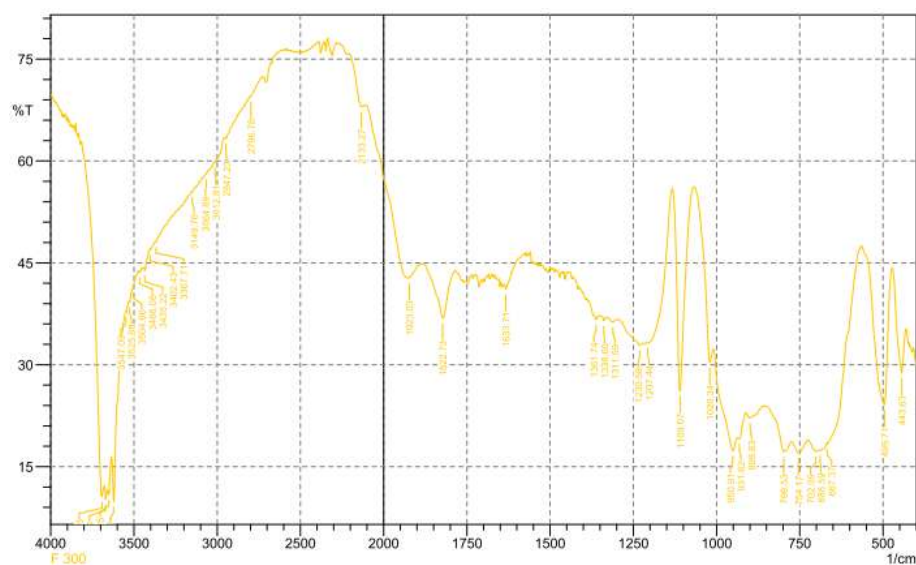
### B. Hasil Pengujian Uv-Vis



Gambar 4. Hasil pengujian UV Vis karbon aktif, kaolin clay, kombinasi karbon aktif dan kaolin clay.

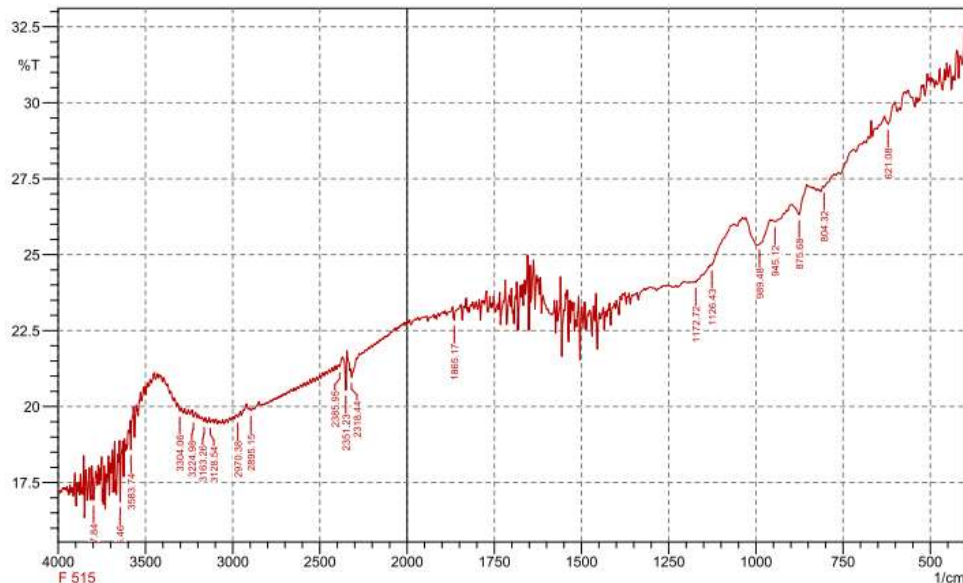
Gambar 4 menunjukkan hasil reflektansi fotokatalis karbon aktif, kaolin clay, kombinasi karbon aktif dan kaolin clay. Garis biru menunjukkan kaolin clay. Garis merah untuk karbon aktif. Garis hijau merupakan kombinasi karbon aktif dan kaolin clay. Ketiga fotokatalis tersebut mempunyai rentang reflektansi pada 200-300 nm. Artinya pada panjang gelombang tersebut, ketiga fotokatalis mampu menyerap cahaya secara optimal.

### C. Hasil Pengujian Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (Ftir)



Gambar 5. Hasil pengujian FTIR kaolin clay.

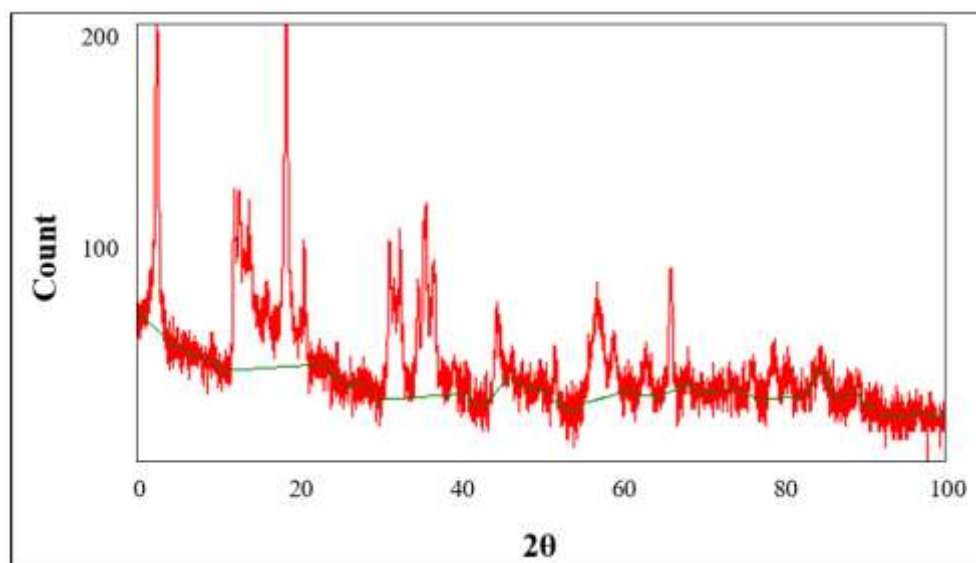
Gambar 5 menunjukkan hasil pengujian FTIR pada kaolin clay. Munculnya puncak pada panjang gelombang  $675-995\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya gugus fungsi C-H alkena. Puncak muncul pada panjang gelombang  $690-900\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya gugus fungsi C-H cincin aromatik. Muncul puncak pada panjang gelombang  $1050-1300\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya gugus fungsi C-O alkohol/eter/asam karboksilat/ester. Munculnya puncak pada panjang gelombang  $1180-1360\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya gugus fungsi C-N amina/amida. Muncul puncak pada panjang gelombang  $3500-3650\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya gugus fungsi O-H asam karboksilat monomer. Muncul puncak pada panjang gelombang  $3590-36650\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya gugus fungsi O-H alkohol monomer/fenol.



Gambar 6. Hasil Pengujian FTIR karbon aktif.

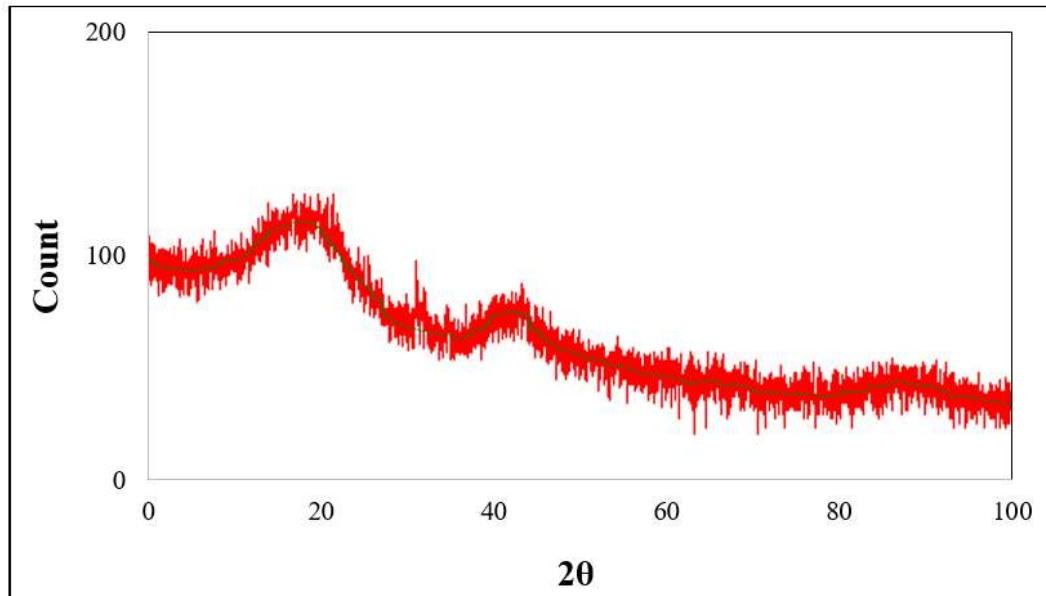
Gambar 6 menunjukkan hasil pengujian FTIR karbon aktif. Muncul puncak pada panjang gelombang  $675-995\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya gugus fungsi C-H alkena. Munculnya puncak pada panjang gelombang  $690-900\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya gugus fungsi C-H cincin aromatik.

#### D. Hasil Pengujian X-Ray Diffraction (Xrd)



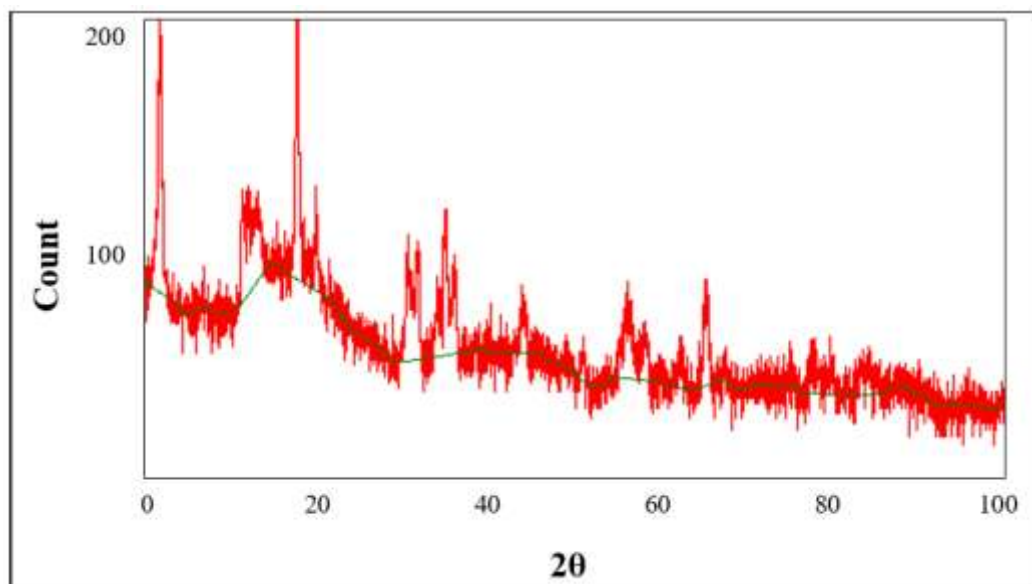
Gambar 7. Hasil Pengujian XRD kaolin clay.

Dari Gambar 7 terdapat puncak pada sudut 20-30, 35-40, 45-50, 55-60, dan 60-65. Hal ini menunjukkan kaolin clay mempunyai densitas elektron yang tinggi. Hal ini dibuktikan dengan banyaknya puncak pada beberapa sudut.



Gambar 8. Hasil Pengujian XRD karbon aktif.

Gambar 8 menunjukkan karbon aktif mempunyai puncak pada sudut 20-30. Artinya densitas elektron karbon aktif sangat tinggi pada sudut tersebut, yaitu sebesar 75 counts. Setelah melewati sudut 30, jumlah count cenderung menurun.

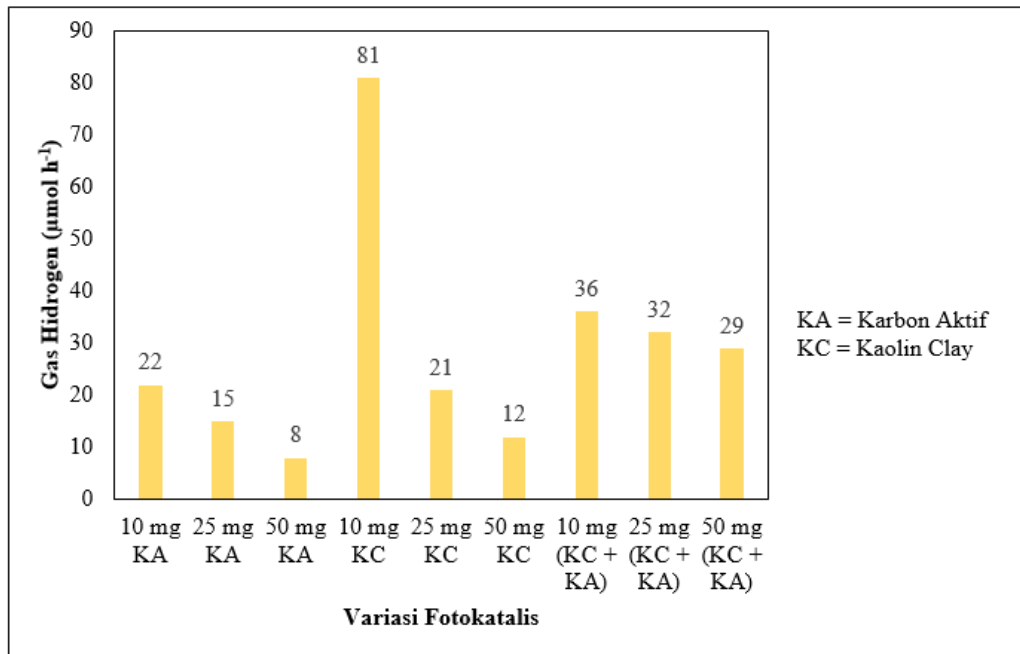


Gambar 9. Hasil Pengujian XRD kombinasi karbon aktif dan kaolin clay.

Dari Gambar 9 terdapat puncak pada sudut 20-30, 35-40, 55-60, dan 60-65. Hal ini menunjukkan kombinasi karbon aktif dan kaolin clay mempunyai densitas elektron yang tinggi. Hal ini dibuktikan dengan banyaknya puncak pada beberapa sudut.

Copyright©2022 Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi. This is an open access article under the CC-BY-SA licence (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

### E. Hasil Pengujian Fotokatalisis



Gambar 10. Produksi Gas Hidrogen.

Gambar 10 menunjukkan produksi gas hidrogen dengan metode pemisahan air fotokatalisis. Fotokatalisis dilakukan selama 1 jam. Fotokatalis terdiri dari karbon aktif dan kaolin clay yang dilarutkan pada 100 mL air murni. Sumber energi cahaya yang digunakan adalah lampu halogen 300 W dengan panjang gelombang dari 560nm. Komposisi fotokatalis dibuat bervariasi untuk mengetahui pengaruhnya terhadap gas hidrogen yang dihasilkan. Jumlah fotokatalis mulai dari 10mg, 25mg, dan 50mg. Pada fotokatalis karbon aktif jumlah gas hidrogen tertinggi terjadi pada saat digunakan 10mg karbon aktif. Seiring bertambahnya jumlah karbon aktif, gas hidrogen yang dihasilkan cenderung menurun. Kondisi ini disebabkan karbon aktif yang terdiri dari honeycomb structure defect mempunyai ambang batas untuk melakukan pemutusan ikatan pada air. Air terdiri dari ikatan hidrogen dan ikatan kovalen. Ketika ikatan hidrogen dilemahkan oleh honeycomb structure defect maka gaya untuk memutus ikatan kovalen pada air akan lebih besar.

Pada fotokatalis kaolin clay, 10mg kaolin clay memberikan efek yang signifikan dalam reaksi fotokatalisis. 81 µmol h<sup>-1</sup> gas hidrogen yang dihasilkan menunjukkan peran kaolin clay yang dominan dalam proses fotokatalisis jika dibandingkan dengan penggunaan fotokatalis karbon aktif. Kaolin clay mempunyai rumus molekul Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>. Kandungan silika di dalam kaolin clay sebesar 7,58%. Unsur silika tersebut berfungsi penting dalam reaksi pemutusan ikatan hidrogen pada larutan fotokatalisis.

Pada kombinasi 10 sampai 50 mg fotokatalis kaolin clay dan karbon aktif, gas hidrogen yang dihasilkan berada pada rentang 29-36 µmol h<sup>-1</sup>. Meskipun kedua fotokatalis dikombinasi, produksi hidrogen tidak lebih tinggi jika dibandingkan dengan fotokatalis kaolin clay. Kondisi ini disebabkan larutan sudah berada pada fase jenuh sehingga tidak memungkinkan lagi untuk terjadi reaksi pemisahan air fotokatalisis.

### KESIMPULAN

Fotokatalis menggunakan kaolin clay mempunyai peran yang dominan dalam proses pemisahan air fotokatalisis. Penggunaan fotokatalis kaolin clay 10 mg mampu menghasilkan gas hidrogen 81 µmol h<sup>-1</sup>. Copyright © 2022 Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi. This is an open access article under the CC-BY-SA licence (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).



$\mu\text{mol h}^{-1}$ . Hasil ini tentu lebih tinggi dibandingkan penggunaan fotokatalis karbon aktif ataupun kombinasi kaolin clay dan karbon aktif. Kaolin clay yang mempunyai kandungan 7,58% berfungsi penting untuk pemutusan ikatan hidrogen pada larutan fotokatalisis. Selain itu dari hasil pengujian XRD menunjukkan tingginya densitas elektron pada kaolin clay yang berfungsi dalam disosiasi ikatan kovalen pada air.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Zou, G. Zhang, and X. Xu, "One-pot photoreforming of cellulosic biomass waste to hydrogen by merging photocatalysis with acid hydrolysis," *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 563, no. June, pp. 73–79, 2018, doi: 10.1016/j.apcata.2018.06.030.
- [2] T. Udomchoke *et al.*, "Performance evaluation of sorption enhanced chemical-looping reforming for hydrogen production from biomass with modification of catalyst and sorbent regeneration," *Chem. Eng. J.*, vol. 303, pp. 338–347, 2016, doi: 10.1016/j.cej.2016.05.115.
- [3] L. Dai, D. W. Chang, J. B. Baek, and W. Lu, "Carbon nanomaterials for advanced energy conversion and storage," *Small*, vol. 8, no. 8, pp. 1130–1166, 2012, doi: 10.1002/sml.201101594.
- [4] Y. Gong, J. Wang, Z. Wei, P. Zhang, H. Li, and Y. Wang, "Combination of carbon nitride and carbon nanotubes: Synergistic catalysts for energy conversion," *ChemSusChem*, vol. 7, no. 8, pp. 2303–2309, 2014, doi: 10.1002/cssc.201402078.
- [5] T. T. T. Tran, S. Kim, and J. Seo, "Size dependence of perovskite-type BaNbO<sub>2</sub>N particles on sunlight-driven photoelectrochemical water splitting," *J. Catal.*, vol. 406, pp. 157–164, 2022, doi: 10.1016/j.jcat.2022.01.012.
- [6] M. E. Demir, G. Chehade, I. Dincer, B. Yuzer, and H. Selcuk, "Synergistic effects of advanced oxidation reactions in a combination of TiO<sub>2</sub> photocatalysis for hydrogen production and wastewater treatment applications," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 43, pp. 23856–23867, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.07.110.
- [7] C. W. Huang, B. S. Nguyen, J. C. S. Wu, and V. H. Nguyen, "A current perspective for photocatalysis towards the hydrogen production from biomass-derived organic substances and water," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 36, pp. 18144–18159, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.121.
- [8] C. H. Liao, C. W. Huang, and J. C. S. Wu, "Hydrogen production from semiconductor-based photocatalysis via water splitting," *Catalysts*, vol. 2, no. 4, pp. 490–516, 2012, doi: 10.3390/catal2040490.
- [9] H. Park, W. Choi, and M. R. Hoffmann, "Effects of the preparation method of the ternary CdS/TiO<sub>2</sub>/Pt hybrid photocatalysts on visible light-induced hydrogen production," *J. Mater. Chem.*, vol. 18, no. 20, pp. 2379–2385, 2008, doi: 10.1039/b718759a.
- [10] L. Zheng, W. Zhang, and X. Xiao, "Preparation of titanium dioxide/tungsten disulfide composite photocatalysts with enhanced photocatalytic activity under visible light," *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 33, no. 1, pp. 107–113, 2016, doi: 10.1007/s11814-015-0098-7.
- [11] H. Ahmad, S. K. Kamarudin, L. J. Minggu, and M. Kassim, "Hydrogen from photocatalytic water splitting process: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 599–610, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.101.
- [12] W. T. Chen, A. Chan, D. Sun-Waterhouse, T. Moriga, H. Idriss, and G. I. N. Waterhouse, "Ni/TiO<sub>2</sub>: A promising low-cost photocatalytic system for solar H<sub>2</sub> production from ethanol-water mixtures," *J. Catal.*, vol. 326, pp. 43–53, 2015, doi: 10.1016/j.jcat.2015.03.008.
- [13] J. Yan *et al.*, "Design and preparation of CdS/H-3D-TiO<sub>2</sub>/Pt-wire photocatalysis system with enhanced visible-light driven H<sub>2</sub> evolution," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 2, pp. 928–937, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.188.
- [14] P. Prasannalakshmi and N. Shanmugam, "Fabrication of TiO<sub>2</sub>/ZnO nanocomposites for solar energy driven photocatalysis," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 61, no. December 2016, pp. 114–124, 2017, doi: 10.1016/j.mssp.2017.01.008.

- ◆—————→
- [15] D. Wang, Y. Zhang, and W. Chen, “A novel nickel–thiourea–triethylamine complex adsorbed on graphitic C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> for low-cost solar hydrogen production,” *Chem. Commun.*, vol. 50, no. 14, pp. 1754–1756, 2014, doi: 10.1039/c3cc48141g.
  - [16] X. Zhou, Z. Luo, P. Tao, B. Jin, Z. Wu, and Y. Huang, “Facile preparation and enhanced photocatalytic H<sub>2</sub>-production activity of Cu(OH)<sub>2</sub> nanospheres modified porous g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 143, no. 3, pp. 1462–1468, 2014, doi: 10.1016/j.matchemphys.2013.11.066.
  - [17] G. Zhao, X. Huang, F. Fina, G. Zhang, and J. T. S. Irvine, “Facile structure design based on C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> for mediator-free Z-scheme water splitting under visible light,” *Catal. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 6, pp. 3416–3422, 2015, doi: 10.1039/c5cy00379b.