

Hidrogen dari Reaksi Pemecahan Air Menggunakan Aluminium dengan Katalis Basa Abu Tandan Kosong Sawit

Syahrul Khairi,^{1,2*} Erlindawati,³ Triandi Kuseno,⁴ Marcelina,^{1,2} M. Khalid Syafrianto^{2,5}

¹ Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura, Pontianak.

² Laboratorium Kimia, UPT Laboratorium Terpadu, Universitas Tanjungpura, Pontianak.

³ Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tanjungpura, Pontianak.

⁴ Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tanjungpura, Pontianak.

⁵ Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura, Pontianak

email: syahrul.khairi@untan.ac.id

Article history

Received: 30th June 2021

Received in revised form: 1st

September 2021

Accepted: 13th December 2021

DOI: 10.17977/um0260v5i22021p001

Kata-kata kunci:

Abu tandan kosong sawit,

Hidrolisis air

Katalis basa

K_2CO_3

Hidrogen

Abstrak

Potensi abu tandan kosong sawit (ATKS) sebagai sumber katalis basa untuk produksi hidrogen dari hidrolisis air dengan aluminium (Al) menggunakan *handmade reactor* telah dikaji. Kajian ini didahului dengan penggunaan basa konvensional yakni NaOH dan KOH dilanjutkan dengan penggunaan K_2CO_3 dan ATKS sebagai katalis. Katalis dipreparasi melalui pengabuan tandan kosong sawit (TKS) pada suhu 600°C selama 2 jam. Karakterisasi ATKS dilakukan dengan menggunakan *X-ray diffractometer* (XRD) dan spektrofotometer serapan atom (AAS). ATKS mengandung logam Kalium dalam bentuk K_2CO_3 dan KCl, dengan total kalium sebesar 29,3 % berat. Hidrolisis air dilakukan dengan mereaksikan 0,01 g Aluminium dengan larutan KOH, NaOH, K_2CO_3 dan filtrat ATKS dengan variasi konsentrasi. Semakin tinggi konsentrasi katalis menyebabkan jumlah hidrogen yang dihasilkan semakin meningkat. Konversi terbesar diperoleh pada pengaplikasian KOH sebagai katalis. Penggunaan NaOH menyebabkan reaksi berjalan lebih cepat. Penggunaan K_2CO_3 dan filtrat ATKS juga menghasilkan hidrogen dengan kuantitas mendekati NaOH namun dengan laju reaksi yang lebih lambat.

Abstract

The potential of palm empty fruit bunch (EFB) ash as a base catalyst for hydrogen production from hydrolysis of water with Aluminium has been investigated by using a simple hand-made reactor. This study was preceded by using conventional bases, NaOH and KOH, then compared with the use of K_2CO_3 and EFB ash as catalysts. The catalyst was prepared by ashing the EFB at 600°C for 2 h. Characterization of catalyst was conducted by X-Ray Diffraction (XRD) and Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) methods. EFB ash contains potassium in K_2CO_3 and KCl form, with total potassium of 29.3% by weight. Water hydrolysis was carried out by reacting 0.01 g of Aluminum with various concentrations of KOH, NaOH, K_2CO_3 solutions, and EFB ash filtrates. The increasing of catalysts concentration caused the enhancement of hydrogen gas produced. The highest conversion of hydrolysis reaction was obtained by the application of KOH as a catalyst. The utilization of NaOH leads the reaction faster. K_2CO_3 and EFB ash filtrate also can be used to produce hydrogen with a high enough quantity but slower.

PENDAHULUAN

Hidrogen (H_2) berperan penting dalam penyediaan energi di masa mendatang. Selain karena ketersediaan sumber atau bahan baku yang melimpah, hidrogen juga bersifat ramah lingkungan dan memiliki kandungan energi sebesar 286 kJ/mol H_2 (Shwetharani et al., 2019).

Pertumbuhan kendaraan dengan sistem *fuel cell*, menjadikan potensi hidrogen sebagai sumber energi primer di masa depan semakin besar (Ajanovic and Haas, 2021; Olabi et al., 2021). *Fuel cell* merupakan suatu sistem elektrokimia yang memanfaatkan kombinasi hidrogen dan oksigen sebagai sumber energi. Kombinasi hidrogen yang mengalami oksidasi di anoda dan

reduksi oksigen di katoda menghasilkan arus listrik yang digunakan sebagai sumber energi dengan uap air sebagai hasil samping reaksi (Blomen and Mugerwa, 1993).

Hidrogen dapat diperoleh dari pemecahan molekul air. Berbagai macam metode telah dikembangkan untuk memisahkan hidrogen dari air seperti *photocatalytic water splitting* (Fajrina and Tahir, 2019; Lin et al., 2019; Lu et al., 2018), dan *thermochemical water splitting* (Safari and Dincer, 2020; Zhai et al., 2018). Penggunaan metode ini membutuhkan energi tinggi dan sistem yang kompleks. Salah satu cara memproduksi hidrogen dengan metode sederhana adalah dengan mereaksikan logam aluminium (Al) dan air dengan bantuan katalis basa. Umumnya proses produksi hidrogen ini dilakukan dalam suasana basa dengan menggunakan katalis konvensional KOH (Pednekar et al., 2021; Tekade et al., 2020) dan NaOH (Bolt et al., 2020; Irankhah et al., 2018). Kedua katalis ini merupakan katalis konvensional yang memiliki beberapa kelemahan, antara lain bersifat korosif dan tidak ramah lingkungan. Dengan demikian, diperlukan suatu katalis basa alternatif yang dapat digunakan dalam proses produksi gas H₂.

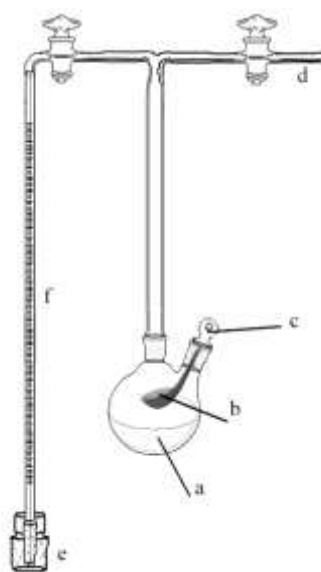
Limbah TKS merupakan limbah padatan dari pabrik pengolahan minyak kelapa sawit. TKS yang diabukan atau yang selanjutnya disebut dengan abu tandan kosong sawit (ATKS) mengandung 30-40% logam kalium dalam bentuk senyawa K₂O (Fauzi et al., 1992). Kalium dalam ATKS yang diabukan pada suhu dibawah 600°C, akan menghasilkan senyawa K₂CO₃ (Sibarani et al., 2010). Selain itu, kalium dalam ATKS yang bereaksi dengan air juga akan menghasilkan senyawa KOH yang bersifat basa. Dengan demikian, penelitian ini mengkaji potensi ATKS sebagai sumber ion kalium yang difungsikan sebagai promotor atau katalis basa pada reaksi pemecahan air dengan logam Al untuk produksi hidrogen. Penggunaan KOH dan NaOH juga dilakukan sebagai pembanding.

METODE

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah tandan kosong sawit (TKS) yang diperoleh dari sisa pengolahan industri sawit di Kalimantan Barat, natrium hidroksida (NaOH) p.a. E-Merck, kalium hidroksida (KOH) p.a. E-Merck, kalium karbonat (K₂CO₃) p.a.

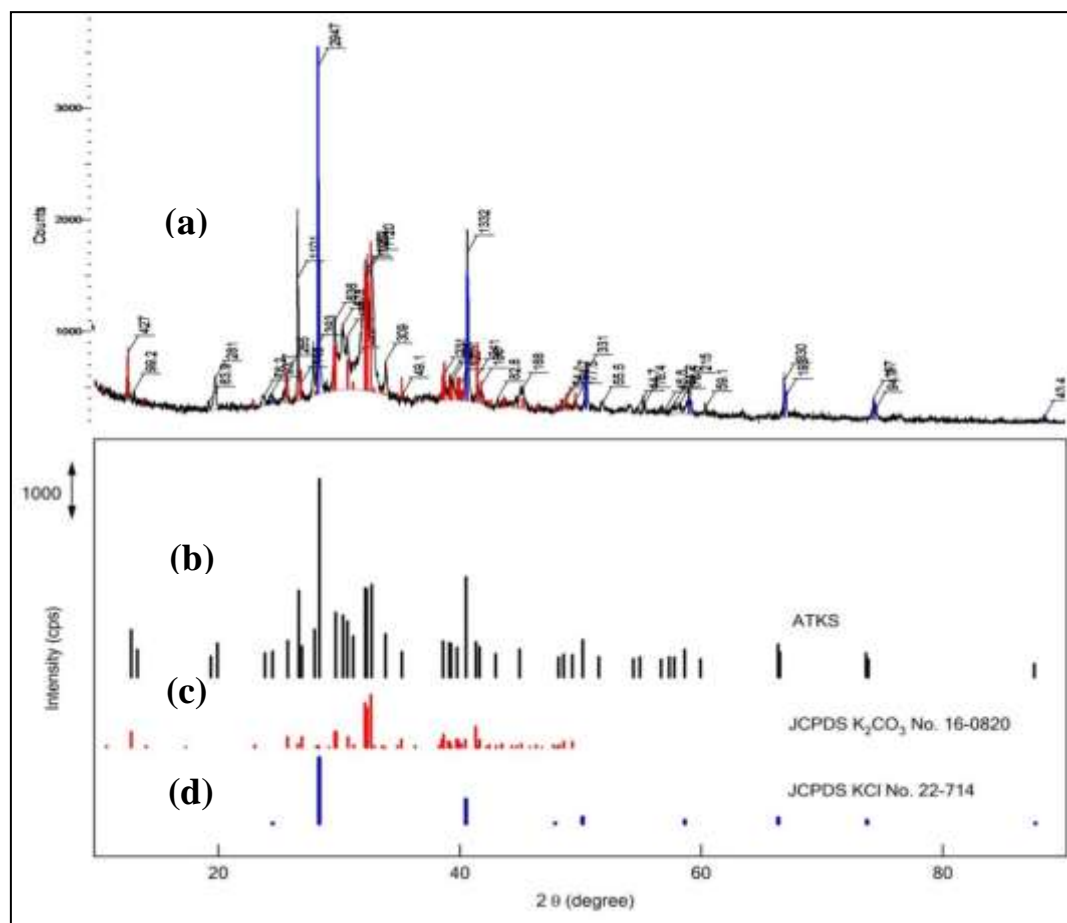
EMSURE, aluminium (foil) for analysis EMSURE, dan akuades.

TKS diabukan pada 600°C selama 2 jam untuk mendapatkan ATKS dan kemudian difiltrasi dengan menggunakan ayakan 100 mesh guna mendapatkan homogenitas ukuran partikel. Konfirmasi keberadaan K₂CO₃ dalam sampel ATKS dianalisis dengan metode *X-ray diffraction* (XRD) yang dilakukan di laboratorium Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung (ITB). Analisis kandungan kalium dalam ATKS dilakukan di laboratorium Badan Riset dan Standardisasi (baristand) Pontianak dengan metode *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS).



Gambar 1. Handmade reactor ukuran 50 mL yang digunakan untuk menentukan kuantitas gas hidrogen yang dihasilkan dari reaksi pemecahan air menggunakan aluminium dengan katalis basa. (a) larutan basa, (b) wadah untuk menampung logam Al sebelum dijatuhkan ke larutan basa dalam keadaan vakum, (c) tuas pemutar wadah penampung logam Al, (d) konektor ke pompa vakum, (e) air raksa, (f) manometer.

Pada tahap produksi hidrogen, larutan KOH dan NaOH dengan konsentrasi masing-masing sebesar 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; dan 1,0 M disiapkan dalam wadah plastik. Masing-masing dari 10 mL larutan basa tersebut dimasukkan ke *handmade reactor* yang memiliki volume total 50 mL yang telah terhubung dengan pompa vakum dan manometer (Gambar 1). Setelah tekanan sistem diturunkan hingga mendekati 0 atm, sebanyak 0,01 g Al dijatuhkan dari wadah ke larutan basa



Gambar 2. Karakterisasi XRD Abu Tandan Kosong Sawit (ATKS) (a) difraktogram ATKS, (b) stik plot difraktogram ATKS, (c) K_2CO_3 JCPDS No. 16-0820, (d) KCl JCPDS No.

dengan memutar tuas. Reaksi dilakukan pada suhu kamar yakni 303 K hingga tidak ada gas yang dihasilkan. Perubahan tekanan yang terjadi di dalam sistem dianggap sebagai kuantitas gas hidrogen yang dihasilkan. Prosedur yang sama juga diterapkan pada uji aktivitas K_2CO_3 dan ATKS sebagai katalis pemecahan air. Sejumlah tertentu ATKS disuspensikan dalam akuades sehingga konsentrasi ion kalium menjadi sebesar 0,4; 0,8; 1,2; dan 1,6 M. Suspensi diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 6 jam. Setelah dipisahkan dari residunya, filtrat direaksikan dengan aluminium dalam *handmade reactor* vakum hingga pembentukan gas berhenti. Perubahan tekanan gas yang terjadi diamati dan jumlah mol gas hidrogen yang dihasilkan dihitung.

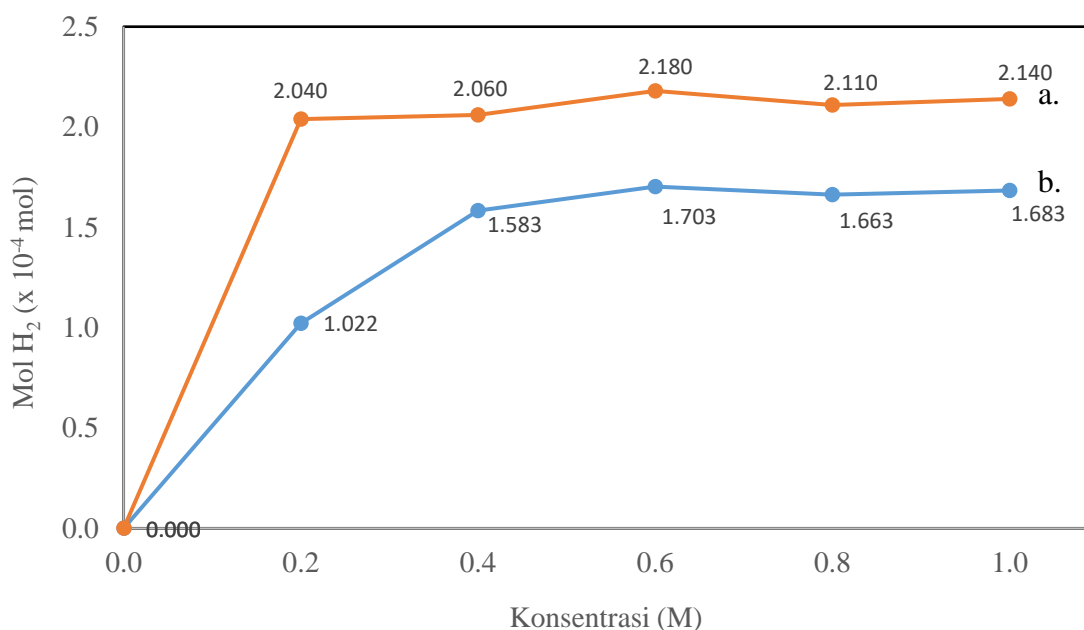
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini ATKS dikaji potensinya untuk dijadikan sebagai katalis basa pada reaksi hidrolisis air dengan logam aluminium. Sebagai pengganti katalis basa konvensional, aktivitas

ATKS dibandingkan dengan aktivitas dari NaOH dan KOH pada reaksi produksi hidrogen tersebut. ATKS yang diperoleh dari pengabuan TKS pada suhu 600°C diduga mengandung logam kalium dalam bentuk K_2CO_3 , sehingga dalam penelitian ini larutan K_2CO_3 juga digunakan untuk mengetahui kemampuan senyawa tersebut sebagai katalis basa pada reaksi yang sama. Keberadaan mineral K_2CO_3 dalam sampel ATKS dibuktikan dengan analisis difraksi sinar-X (XRD) dan kadar kalium dalam sampel dikonfirmasi dengan analisis spektroskopi serapan atom (AAS). Selain kuantitas gas hidrogen yang dihasilkan, waktu reaksi juga menjadi salah satu kajian pada penelitian ini

Karakterisasi ATKS

Karakterisasi kristalinitas ATKS dilakukan dengan metode XRD, sedangkan kandungan total kalium dianalisis dengan metode AAS. Gambar 2 menyajikan difraktogram ATKS yang dibandingkan dengan difraktogram K_2CO_3 standar (JCPDS No. 16-0820) dan difraktogram KCl standar (JCPDS No. 22-714). Hasil analisis



Gambar 3. Gas hidrogen yang dihasilkan dari hidrolisis air menggunakan (a) KOH dan (b) NaOH sebagai katalis basa dengan 0,01 g Al, pada suhu 303 K

XRD menunjukkan bahwa sampel ATKS mengandung kalium dalam bentuk senyawa K_2CO_3 dan senyawa KCl. Seperti yang dilaporkan oleh Sibarani et al pada tahun 2010, pengabuan pada suhu $600^\circ C$, sebagian besar kalium dalam sampel akan berada dalam spesies K_2CO_3 .

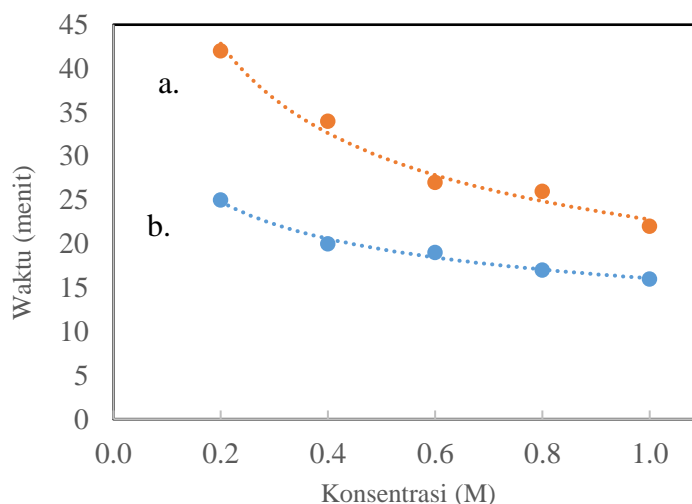
Total kandungan kalium dalam sampel dianalisis dengan metode spektrofotometri serapan atom (AAS). Hasil analisis yang diperoleh menunjukkan total kalium sebanyak 29,3 wt% di dalam sampel ATKS. Tingginya kandungan kalium dalam ATKS juga pernah dilaporkan sebesar 30-40 wt% (Fauzi et al., 1992). Pada penelitian ini tidak dilakukan analisis persentase komposisi K_2CO_3 dan KCl. Namun berdasarkan apa yang telah dilaporkan oleh Sanjaya et al pada tahun 2018, yang menyatakan bahwa mayoritas kalium berada dalam spesies K_2CO_3 (Sanjaya et al., 2018), maka perhitungan penentuan dosis ATKS yang disuspensikan ke dalam akuades dalam penelitian ini menggunakan berat molekul dari K_2CO_3 .

Pemanfaatan NaOH dan KOH sebagai katalis reaksi pemecahan air dengan Al

Larutan NaOH dan KOH merupakan larutan basa yang umum digunakan sebagai katalis berbagai macam reaksi. Gambar 3. menyajikan informasi mengenai kuantitas gas hidrogen yang dihasilkan dari hidrolisis air menggunakan NaOH dan KOH sebagai katalis basa sebagai fungsi dari konsentrasi katalis basa.

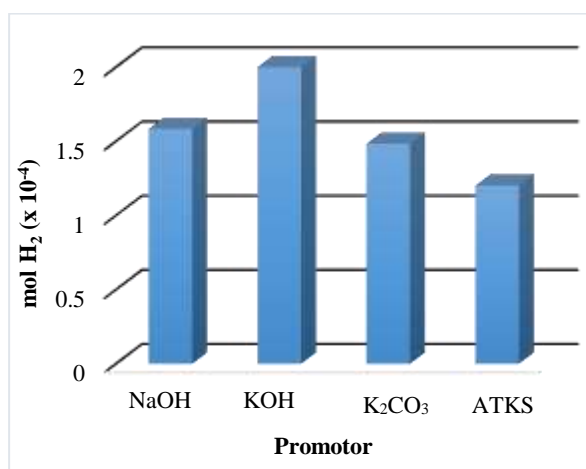
Variasi konsentrasi dilakukan untuk mengetahui konsentrasi efektif basa dalam reaksi hidrolisis air. Baik itu NaOH ataupun KOH, konsentrasi yang digunakan adalah 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 dan 1,0 M. Dari grafik dapat dilihat, jumlah hidrogen yang dihasilkan menunjukkan kecenderungan sebanding dengan konsentrasi basa yang digunakan. Semakin tinggi konsentrasi basa menyebabkan tingginya kuantitas gas hidrogen yang dihasilkan. Pada konsentrasi yang lebih tinggi, intensitas tumbukan antar reaktan semakin tinggi. Akibatnya, jumlah gas hidrogen yang dihasilkan meningkat. Kuantitas gas hidrogen yang dihasilkan sudah cukup tinggi pada yakni di atas 2×10^{-4} mol pada penggunaan KOH dan di atas 1×10^{-4} mol untuk penggunaan NaOH.

Perbandingan performa KOH dengan NaOH juga dapat dilihat pada Gambar 3. Dengan kondisi reaksi yang sama, penggunaan katalis KOH menghasilkan kuantitas hidrogen yang lebih besar dari pada katalis NaOH. Pada konsentrasi masing-masing 0,4 M misalnya, gas hidrogen yang dihasilkan adalah $1,58 \times 10^{-4}$ mol jika menggunakan NaOH dan $2,06 \times 10^{-4}$ mol ketika menggunakan KOH. Meskipun menggunakan konsentrasi yang sama, secara umum di semua konsentrasi, jumlah gas hidrogen yang dihasilkan lebih sedikit ketika menggunakan katalis NaOH jika dibandingkan dengan KOH. Penentuan konsentrasi optimum dilihat dari kuantitas gas hidrogen yang dihasilkan tepat sebelum grafik gambar 3 mulai melandai. Dengan menggunakan



Gambar 4. Pengaruh konsentrasi katalis (a) KOH dan (b) NaOH terhadap waktu reaksi

katalis NaOH, konversi optimum diperoleh pada penggunaan konsentrasi katalis sebesar 0,4 M dengan gas hidrogen yang dihasilkan sebesar $1,58 \times 10^{-4}$ mol, sedangkan penggunaan KOH hanya membutuhkan setengah dari jumlah katalis NaOH yakni 0,2 M untuk mencapai konversi optimum dengan jumlah gas hidrogen yang dihasilkan sebesar $2,04 \times 10^{-4}$ mol.



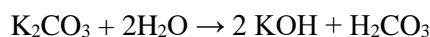
Gambar 5. Jumlah mol gas hidrogen yang dihasilkan oleh masing-masing katalis. Logam Al sebanyak 0,01 g, konsentrasi masing-masing katalis sebesar 0,4 M, suhu 303 K

Gambar 4 menyajikan informasi mengenai waktu reaksi sebagai fungsi dari konsentrasi katalis. Secara umum laju reaksi hidrolisis meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi katalis basa yang ditunjukkan dengan semakin singkatnya waktu reaksi. Jika dibandingkan performa kedua katalis tersebut, reaksi antara 0,01 g Al dengan larutan NaOH relatif lebih cepat jika dibandingkan dengan KOH. Hal ini disebabkan karena ukuran ion Na⁺

yang jauh lebih kecil dari K⁺ sehingga menyebabkan ion Na⁺ bergerak lebih cepat dari pada ion K⁺ di dalam sistem reaksi. Pada konsentrasi rendah, waktu reaksi yang dibutuhkan untuk KOH untuk menghasilkan hidrogen hampir dua kali lebih lambat dari pada NaOH. Seiring dengan meningkatnya konsentrasi, waktu reaksi KOH semakin mendekati NaOH.

Pemanfaatan ATKS sebagai sumber katalis basa pada reaksi pemecahan air dengan Al

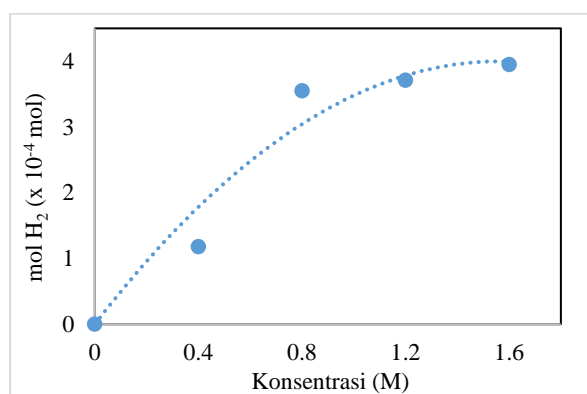
Gambar 5 menyajikan informasi mengenai jumlah gas hidrogen yang dihasilkan dari masing-masing katalis basa konvensional. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa pada katalis NaOH, jumlah gas hidrogen yang dihasilkan tiap menit lebih besar dibanding penggunaan katalis KOH. Sementara pada katalis K₂CO₃, jumlah gas hidrogen yang dihasilkan lebih kecil dan waktu reaksi lebih lama. Hal ini dapat disebabkan terbentuknya asam karbonat ketika K₂CO₃ dilarutkan dalam air, dengan persamaan reaksi sebagai berikut.



Adanya asam lemah ini menyebabkan aktivitas basa dalam mengkatalisis reaksi hidrolisis sedikit berkurang. Akibatnya, waktu reaksi yang diperlukan menjadi lebih lama daripada basa yang lain, dan jumlah gas hidrogen yang dihasilkan lebih kecil.

Pada proses pengaplikasian ATKS sebagai sumber katalis basa, ATKS disuspensikan dalam akuades dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 6 jam untuk memaksimalkan pelarutan kalium dari ATKS di dalam air. Suspensi disaring

guna mendapatkan filtrat larutan kalium untuk selanjutnya digunakan sebagai media reaksi.



Gambar 6. Jumlah gas hidrogen yang dihasilkan sebagai fungsi dari konsentrasi K_2CO_3 dalam ATKS. Logam Al sebanyak 0,01 g, suhu reaksi 303 K

Gambar 6 menyajikan data aktifitas ATKS sebagai sumber K_2CO_3 yang berfungsi sebagai katalis basa pada reaksi hidrolisis air dengan logam Al. Filtrat dengan konsentrasi yang lebih tinggi menghasilkan jumlah hidrogen yang lebih besar. Hasil tersebut menunjukkan bahwa larutan ATKS berpotensi untuk digunakan sebagai pengganti katalis konvensional dalam reaksi pemecahan air dengan logam Al untuk produksi gas hidrogen. Konsentrasi optimum katalis diperoleh sebesar 0,8 M K_2CO_3 ATKS dengan gas hidrogen yang dihasilkan sebesar $3,55 \times 10^{-4}$ mol. Meskipun kuantitas hidrogen yang dihasilkan lebih tinggi dari KOH, namun waktu reaksi yang dibutuhkan rata-rata di atas 180 menit.

KESIMPULAN

Sampel ATKS yang diabukan pada $600^\circ C$ selama 2 jam mengandung Kalium dalam bentuk senyawa K_2CO_3 dan KCl. Kalium total sebanyak 29,3 wt%. Laju reaksi meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi basa. Waktu reaksi tersingkat diperoleh pada penggunaan NaOH sebagai katalis basa dengan rata-rata waktu 19 menit. Kuantitas hidrogen tertinggi diperoleh pada penggunaan KOH sebagai katalis dengan konsentrasi optimum sebesar 0,2 M dengan jumlah hidrogen yang dihasilkan sebesar $2,04 \times 10^{-4}$ mol. Filtrat ATKS dapat digunakan sebagai katalis pada hidrolisis air untuk produksi hidrogen namun dengan performa yang masih di bawah katalis konvensional. Konsentrasi optimum katalis diperoleh pada 0,8 M K_2CO_3 ATKS dengan kuantitas hidrogen yang dihasilkan

sebesar $3,55 \times 10^{-4}$ mol dengan waktu reaksi lebih dari 180 menit.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajanovic, A., Haas, R., 2021. Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector. *Int. J. Hydrog. Energy* 46, 10049–10058. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.122>
- Blomen, L.J.M.J., Mugerwa, M.N. (Eds.), 1993. *Fuel cell systems*. Plenum Press, New York.
- Bolt, A., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., 2020. Experimental study of hydrogen production process with aluminum and water. *Int. J. Hydrog. Energy* 45, 14232–14244. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.160>
- Fajrina, N., Tahir, M., 2019. A critical review in strategies to improve photocatalytic water splitting towards hydrogen production. *Int. J. Hydrog. Energy* 44, 540–577. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.200>
- Fauzi, Y., Widiyastuti, Y.E., Satyawibawa, I., Paeru, R.H., 1992. *Kelapa sawit: usaha budidaya, pemanfaatan hasil dan aspek pemasaran*. Penebar Swadaya, Jakarta.
- Irankhah, A., Seyed Fattahi, S.M., Salem, M., 2018. Hydrogen generation using activated aluminum/water reaction. *Int. J. Hydrog. Energy* 43, 15739–15748. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.014>
- Lin, L., Yu, Z., Wang, X., 2019. Crystalline Carbon Nitride Semiconductors for Photocatalytic Water Splitting. *Angew. Chem. Int. Ed.* 58, 6164–6175. <https://doi.org/10.1002/anie.201809897>
- Lu, Y., Cheng, X., Tian, G., Zhao, H., He, L., Hu, J., Wu, S.-M., Dong, Y., Chang, G.-G., Lenaerts, S., Siffert, S., Van Tendeloo, G., Li, Z.-F., Xu, L.-L., Yang, X.-Y., Su, B.-L., 2018. Hierarchical CdS/m-TiO₂/G ternary photocatalyst for highly active visible light-induced hydrogen production from water splitting with high stability. *Nano Energy* 47, 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.02.021>
- Olabi, A.G., Wilberforce, T., Abdelkareem, M.A., 2021. Fuel cell application in the

- automotive industry and future perspective. *Energy* 214, 118955. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118955>
- Pednekar, A.S., Tekade, S.P., Shende, D.Z., Wasewar, K.L., 2021. Intensification of hydrogen generation through liquid metal gallium in water splitting reaction using aluminum in presence of potassium hydroxide. *Chem. Eng. Commun.* 208, 126–136. <https://doi.org/10.1080/00986445.2019.1694915>
- Safari, F., Dincer, I., 2020. A review and comparative evaluation of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production. *Energy Convers. Manag.* 205, 112182. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112182>
- Sanjaya, A.S., Prajaka, J.A., Aini, N., Soerawidjaja, T.H., 2018. Penentuan Kadar Kalium Dalam Abu Tandan Kosong Kelapa Sawit Daerah Tepian Langsung Kutai Timur Dengan Metode Ekstraksi. *J. INTEGRASI PROSES* 7. <https://doi.org/10.36055/jip.v7i1.2614>
- Shwetharani, R., Nagaraju, D.H., Geetha Balakrishna, R., Suvina, V., 2019. Hydrogenase Enzyme like Nanocatalysts FeS₂ and FeSe₂ for Molecular Hydrogen Evolution Reaction. *Mater. Lett.* 248, 39–42. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.03.131>
- Sibarani, J., Khairi, S., Yoeswono, Y., Wijaya, K., Tahir, I., 2010. EFFECT OF PALM EMPTY BUNCH ASH ON TRANSESTERIFICATION OF PALM OIL INTO BIODIESEL. *Indones. J. Chem.* 7, 314–319. <https://doi.org/10.22146/ijc.21675>
- Tekade, S.P., Pednekar, A.S., Jadhav, G.R., Kalekar, S.E., Shende, D.Z., Wasewar, K.L., 2020. Hydrogen generation through water splitting reaction using waste aluminum in presence of gallium. *Int. J. Hydrog. Energy* 45, 23954–23965. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.026>
- Zhai, S., Rojas, J., Ahlborg, N., Lim, K., Toney, M.F., Jin, H., Chueh, W.C., Majumdar, A., 2018. The use of poly-cation oxides to lower the temperature of two-step thermochemical water splitting. *Energy*