

Pemanfaatan Silikon dari Fly Ash Batubara Dalam Produksi Gas Hidrogen

Sesri Resti*, Robert Junaidi, Linda Ekawati

Jurusan Teknik Kimia, Program Studi Teknologi Kimia Industri, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang

*Koresponden email: sesriresti@gmail.com

Diterima: 18 Januari 2026

Disetujui: 23 Januari 2026

Abstract

Hydrogen is a promising alternative energy source that can support the transition to clean energy. However, conventional methods of producing hydrogen still present challenges in the form of high energy consumption and dependence on fossil fuels. This study aims to use coal fly ash waste as a raw material for hydrogen production by extracting and reducing silica (SiO_2) to silicon (Si) using a metallothermal method with magnesium (Mg) as the reducer. The resulting silicon reacts with a potassium hydroxide (KOH) solution to produce hydrogen gas. Variations in the Mg: SiO_2 ratio (1:1, 1.5:1, and 2:1) and KOH concentration (2 M, 2.5 M, 3 M, and 3.5 M) were used to optimize hydrogen production. Results showed that increasing the Mg: SiO_2 ratio and KOH concentration significantly affected the amount of silicon produced and the volume of hydrogen gas formed. X-ray fluorescence (XRF) analysis showed that the reduced silicon was 66.5% pure, and Fourier-transform infrared (FTIR) analysis confirmed the presence of Si-Si bonds at a wave number of 506–533 cm^{-1} . Thus, using coal fly ash as a source of silicon is an efficient, sustainable, and environmentally friendly approach to hydrogen production.

Keywords: *hydrogen, coal fly ash, silicon, metallothermic reduction*

Abstrak

Hidrogen merupakan salah satu sumber energi alternatif yang menjanjikan dalam mendukung transisi menuju energi bersih. Namun, metode produksi hidrogen konvensional masih menghadapi tantangan berupa konsumsi energi tinggi dan ketergantungan pada bahan baku fosil. Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan limbah fly ash batubara sebagai bahan dasar dalam produksi hidrogen melalui proses ekstraksi silika (SiO_2) dan reduksi menjadi silikon (Si) menggunakan metode metalotermal dengan magnesium (Mg) sebagai reduktor. Silikon yang dihasilkan kemudian direaksikan dengan larutan KOH untuk menghasilkan gas hidrogen. Penelitian ini menggunakan variasi rasio Mg: SiO_2 (1:1, 1,5:1, dan 2:1) serta variasi konsentrasi KOH (2 M, 2,5 M, 3 M, dan 3,5 M) untuk mengoptimalkan produksi hidrogen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan rasio Mg: SiO_2 dan konsentrasi KOH memberikan pengaruh signifikan terhadap jumlah silikon yang dihasilkan dan volume gas hidrogen yang terbentuk. Analisis XRF menunjukkan bahwa silikon hasil reduksi memiliki kemurnian mencapai 66,5%, sedangkan analisis FTIR mengkonfirmasi keberadaan ikatan Si Si pada bilangan gelombang 506–533 cm^{-1} . Dengan demikian, pemanfaatan fly ash batubara sebagai sumber silikon dapat menjadi pendekatan yang efisien dan berkelanjutan dalam produksi hidrogen ramah lingkungan.

Kata kunci: *hidrogen, fly ash batubara, silikon, reduksi metalotermal*

1. Pendahuluan

Hidrogen, dengan cadangan bahan baku yang berlimpah, dikenal sebagai sumber energi ramah lingkungan yang menyimpan energi hingga 286 kJ/mol H_2 [1]. Energi ini memiliki potensi besar dalam mendorong transisi menuju sistem energi masa depan yang berkelanjutan. Di Indonesia, menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral [2], konsumsi hidrogen mencapai 1,75 juta ton per tahun, di mana sebagian besar dimanfaatkan untuk produksi urea (88%), disusul amonia (4%), serta kilang minyak (2%).

Hidrogen bisa dihasilkan melalui dua metode, yaitu elektrolisis dan non-elektrolisis. Pada metode elektrolisis, air (H_2O) diurai menjadi hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) dengan memanfaatkan arus listrik. Proses ini biasanya berjalan dengan cukup lambat, sehingga dibutuhkan katalis untuk mempercepat reaksinya agar meningkatkan produksi hidrogen [3]. Wardani dkk. [4] menekankan bahwa kelemahan utama dari metode elektrolisis dalam menghasilkan gas hidrogen terletak pada tingginya konsumsi energi listrik, sehingga dibutuhkan upaya optimasi dan peningkatan efisiensi dalam penerapannya.

Metode yang tidak melibatkan elektrolisis ini tidak memanfaatkan energi listrik, tetapi menggunakan katalis untuk menghasilkan hidrogen. Salah satu cara yang umum dipakai untuk mereduksi silika menjadi silikon adalah melalui teknik reduksi metalotermal dengan magnesium (Mg) bertindak sebagai agen pereduksi. Proses ini dilakukan pada suhu tinggi di dalam furnace, di mana perbandingan antara silika dan magnesium sangat menentukan tingkat efisiensi reduksi sekaligus kemurnian silikon yang dihasilkan [5].

Mengacu pada latar belakang yang telah dijelaskan, penelitian ini bertujuan untuk memaksimalkan produksi gas hidrogen dengan memanfaatkan silikon (Si) yang dihasilkan dari reduksi silika di fly ash batubara melalui metode metalotermal. Optimalisasi dilakukan melalui variasi konsentrasi KOH dan massa Mg, dengan harapan dapat meningkatkan hasil produksi gas hidrogen secara signifikan. Penelitian ini juga memperkuat temuan sebelumnya, seperti yang ditunjukkan oleh Meilianti dkk. [6], bahwa pemanfaatan batubara beserta turunannya memiliki potensi besar sebagai sumber bahan baku alternatif dalam menghasilkan energi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Hasil terbaik dari penelitian Nurmahdani dkk. [7] diperoleh pada rasio silika dan magnesium 1:1 dengan penambahan NaOH 3 M, yang menghasilkan gas hidrogen sebesar 2,647 ppm. Penelitian serupa dilakukan oleh Azzahra dkk. [8] dengan memanfaatkan limbah kaleng aluminium sebagai bahan utama dalam produksi hidrogen menggunakan katalis KOH. Variasi massa aluminium yang diterapkan mencakup 2, 2,5, dan 3 gram, dilengkapi dengan tambahan aquadest serta katalis KOH pada konsentrasi 1, 1,5, 2, dan 2,5 M. Hasil percobaan ini menampilkan bahwa volume gas hidrogen tertinggi yang dihasilkan mencapai 4,70 liter, dihasilkan dengan penggunaan 3 gram aluminium pada konsentrasi KOH 2,5 M. Penelitian berbeda oleh Khairi beserta timnya [9] melibatkan penggunaan aluminium foil dan katalis basa dengan berbagai konsentrasi, yaitu 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, dan 1 M.

Penelitian ini menunjukkan bahwa dalam kondisi reaksi yang sama, katalis KOH dapat menghasilkan hidrogen lebih banyak dibandingkan dengan NaOH. Pada konsentrasi 0,4 M, volume gas hidrogen yang didapat dengan katalis NaOH adalah $1,58 \times 10^{-4}$ mol, sedangkan dengan KOH bisa mencapai $2,06 \times 10^{-4}$ mol. Dalam penelitian ini, rasio Mg terhadap SiO_2 yang digunakan dalam proses reduksi yaitu 1:1, 1,5:1, dan 2:1 (m/m), sementara konsentrasi KOH diubah-ubah menjadi 2, 2,5, 3, dan 3,5 M. Alasan memilih rasio-rasio ini adalah karena penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa menambahkan jumlah Mg dan meningkatkan konsentrasi KOH dapat meningkatkan efisiensi dalam mereduksi silika menjadi silikon.

Silika merupakan elemen krusial dalam proses produksi hidrogen. Beberapa sumber silika yang dapat dimanfaatkan termasuk abu terbang dari batubara [7], abu dasar dari batubara [10], cangkang kelapa sawit [11], dan sekam padi [12]. Pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), proses pembakaran batubara menghasilkan limbah padat berupa abu yang terbagi menjadi fly ash dan bottom ash. Hanya sekitar 5% dari keseluruhan batubara yang dibakar berubah menjadi abu. Dari jumlah abu tersebut, fly ash menyumbang sekitar 80–90%, sementara bottom ash berkontribusi sebesar 10–20% [13]. Apabila silika dari abu ini berhasil direduksi menjadi silikon secara optimal, maka fly ash berpotensi menjadi sumber silikon alternatif yang lebih ekonomis sekaligus berkelanjutan [14].

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan produksi gas hidrogen melalui pemanfaatan silikon hasil reduksi silika dari fly ash batubara menggunakan metode metalotermal. Upaya peningkatan dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi KOH serta massa Mg. Melalui pengaturan kedua variabel tersebut, diharapkan produksi hidrogen dapat dicapai secara lebih optimal.

2. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini, material serta alat yang dimanfaatkan meliputi fly ash batubara yang berfungsi sebagai sumber silika, kalium hidroksida (KOH) dengan variasi konsentrasi tertentu, aquadest sebagai pelarut, asam klorida (HCl) untuk proses pencucian, serta magnesium (Mg) sebagai reduktor dalam metode metalotermal. Alat-alat yang digunakan mencakup gelas kimia, gelas ukur, erlenmeyer, labu ukur, pipet ukur, kaca arloji, dan pengaduk kaca untuk mengukur dan mencampur bahan. Pemanasan dilakukan dengan hot plate, oven, dan furnace. Selain itu, digunakan pula neraca analitik untuk penimbangan bahan, magnetic stirrer untuk pengadukan larutan, spatula, bola karet, serta stopwatch sebagai alat bantu pengontrol waktu dan lain-lain.

Penelitian ini melibatkan enam tahapan, yaitu persiapan fly ash batubara, pembuatan larutan, ekstraksi silika, isolasi silikon menggunakan metode metalotermal yang sederhana, pemurnian silikon, serta pembuatan aplikasi silikon untuk produksi hidrogen. Pada langkah persiapan ini, fly ash sebanyak 400 gram direndam terlebih dahulu dalam air mendidih selama dua jam. Tujuannya adalah untuk menghilangkan

kotoran yang dapat mengganggu proses ekstraksi silika. Pasca perendaman, fly ash dimurnikan melalui penyaringan dan dikeringkan sebelum dipanaskan dalam oven pada suhu 120 °C selama maksimal enam jam. Hasil akhirnya adalah fly ash murni yang kemudian ditimbang untuk digunakan dalam tahap penelitian selanjutnya.

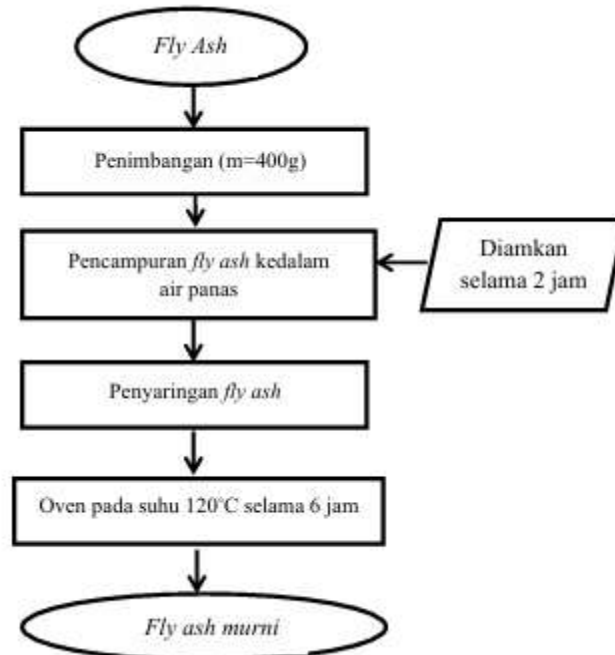
Tahap pembuatan larutan dilakukan dengan menyiapkan beberapa larutan yang diperlukan dalam penelitian. Pertama, larutan KOH 1 M dibuat dengan cara menimbang 39,99 g KOH kemudian melarutkannya ke dalam 1000 ml aquadest. Selanjutnya, larutan HCl 2 M disiapkan dengan mengencerkan 166,67 ml HCl 37% ke dalam labu ukur 250 ml hingga mencapai tanda batas menggunakan aquadest. Selain itu, larutan KOH dengan variasi konsentrasi 2; 2,5; 3; dan 3,5 M dibuat dengan menimbang masing-masing 28,06 g; 35,08 g; 42,08 g; dan 49,10 g KOH, lalu melarutkannya ke dalam labu ukur 250 ml hingga volume tepat pada tanda batas.

Pada tahap ekstraksi silika, sebanyak 75 g silika dicampurkan dengan 150 ml KOH 1 M, kemudian dipanaskan pada suhu 65–70 °C selama tiga jam dengan kecepatan pengadukan 150 rpm. Campuran ini kemudian disaring, dan filtrat yang memiliki silika terlarut dikumpulkan. Setelah itu, HCl pekat ditambahkan secara bertahap hingga tidak terbentuk lagi endapan silika dan pH larutan menjadi netral. Silika yang mengendap kemudian dipisahkan dan dicuci dengan air panas agar residu asam terbuang, setelah itu dikeringkan menggunakan oven pada suhu berkisar antara 100 hingga 110 °C selama empat jam. Hasil penelitian oleh Nurmazaya *et al.* [15] menunjukkan bahwa suhu pembakaran yang terlalu tinggi akan menyebabkan struktur silika berubah menjadi kristalin sehingga rendemen menurun.

Langkah selanjutnya adalah memisahkan silikon menggunakan metode metalotermal yang sederhana, yakni dengan mencampur silika dengan bubuk magnesium dalam proporsi 1:1 (massa/massa). Campuran kemudian dipanaskan pada suhu 650 °C selama tiga jam. Proses reduksi ini diulangi dengan variasi perbandingan Mg:silika sebesar 1,5:1 dan 2:1. Rizky *et al.* [16] melaporkan bahwa perlakuan pembakaran (suhu dan durasi) menentukan fraksi amorf dan kristalin silika pada abu biomassa, yang relevan untuk menjelaskan perubahan karakterisasi FTIR dan XRF yang diamati pada produk hasil ekstraksi pada penelitian ini.

Setelah tahap reduksi, silikon yang diperoleh menjalani proses pemurnian. Sampel silikon dimasukkan ke dalam beaker dan ditambahkan 150 ml larutan HCl dengan konsentrasi 2 M. Campuran ini dipanaskan hingga mencapai suhu 80 °C sambil diaduk menggunakan stirrer selama tiga jam. Selanjutnya, sampel didinginkan dan disaring menggunakan kertas saring Whatman No.41 untuk memisahkan padatan dari filtrat. Padatan kemudian dicuci hingga mencapai pH netral sebelum dikeringkan dan ditimbang. Sampel silikon hasil reduksi selanjutnya dianalisis menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) dan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).

Langkah akhir adalah pengaplikasian silikon dalam proses produksi hidrogen. Bubuk silikon dicampur dengan perbandingan Mg:SiO₂ sebesar 1:1, dimasukkan ke dalam reaktor, kemudian dilarutkan dalam 50 ml KOH dengan variasi konsentrasi 2, 2,5, 3, dan 3,5 M. Campuran direaksikan di dalam reaktor selama 15 menit hingga mencapai suhu 50 °C. Gas hidrogen yang terbentuk ditampung menggunakan urine bag, kemudian dianalisis menggunakan Multigas Detector Analyzer. Prosedur ini diulang untuk rasio Mg:SiO₂ sebesar 1,5:1 dan 2:1 pada setiap variasi konsentrasi KOH. Diagram alir preparasi sampel fly ash batubara dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Diagram Alir Preparasi Sampel

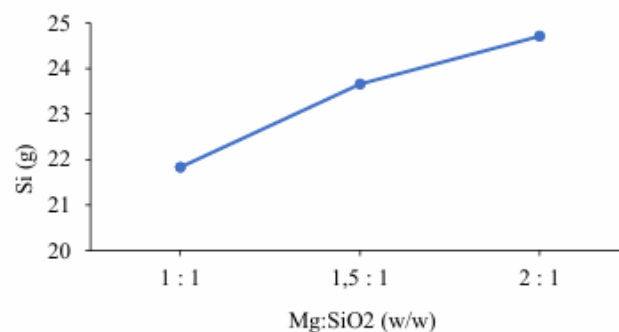
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Reduksi Silika Menjadi Silikon

Proses penelitian diawali dengan ekstraksi silika dari fly ash menggunakan larutan KOH 1 M, metode yang umum digunakan untuk memisahkan silika amorf dari campuran logam oksida. Hanum dkk. [17] menunjukkan bahwa metode ini, yang dilanjutkan dengan pengendapan menggunakan HCl, mampu menghasilkan silika amorf dengan efisiensi tinggi. Dari 75 gram sampel fly ash batubara yang diekstraksi, diperoleh massa terbesar yaitu 34,17 g SiO₂. Berdasarkan literatur, ion OH⁻ dalam larutan basa akan melarutkan silika menjadi silikat larut seperti K₂SiO₃, yang kemudian mengendap sebagai gel silika amorf (SiO₂) setelah ditambahkan HCl [18]. Tahap berikutnya adalah reduksi silika menggunakan serbuk magnesium pada suhu 650 °C selama 3 jam di dalam furnace. Reaksi utama yang terjadi ditunjukkan pada Persamaan (1):



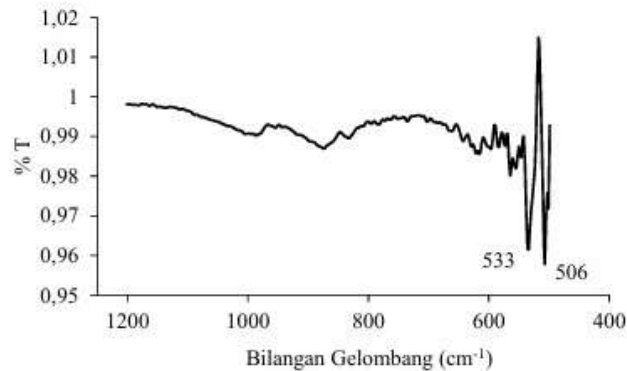
Reaksi ini termasuk reaksi redoks metalotermal, dengan magnesium bertindak sebagai reduktor. Pada suhu tinggi, Mg mereduksi SiO₂ menjadi silikon elemental dan menghasilkan MgO sebagai residu padat. Peningkatan rasio Mg terhadap SiO₂ terbukti berpengaruh terhadap massa silikon yang dihasilkan. Pada rasio 1:1 hingga 2:1, terjadi peningkatan massa silikon dari 21,83 g menjadi 24,71 g. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah magnesium merupakan faktor penentu dalam reaksi reduksi. Data hasil penelitian memperlihatkan tren bahwa semakin tinggi rasio Mg:SiO₂, maka massa silikon yang diperoleh semakin meningkat. Temuan ini sejalan dengan penelitian Kim dkk. [19] yang berhasil mereduksi silika menggunakan magnesium pada suhu 650 °C dengan efisiensi tinggi serta mempertahankan struktur pori silikon yang dihasilkan. Pengaruh rasio Mg dan SiO₂ terhadap massa silikon dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Pengaruh Rasio Mg Dan SiO₂ Terhadap Berat Silikon

3.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Analisis Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) merupakan salah satu metode karakterisasi spektroskopi yang digunakan untuk mengidentifikasi ikatan kimia dan gugus fungsi dalam suatu senyawa atau material padat. Dalam penelitian ini, FTIR digunakan untuk memastikan bahwa proses reduksi silika (SiO_2) menjadi silikon elemental (Si) telah berlangsung dengan baik. Sampel yang digunakan dalam analisis FTIR merupakan hasil reduksi silika dengan rasio Mg: SiO_2 sebesar 2:1, karena pada rasio tersebut diperoleh massa silikon tertinggi, yaitu 24,71 gram. Untuk pengujian FTIR, diambil sebanyak 5 gram sampel silikon hasil reduksi. Pemilihan rasio Mg: SiO_2 sebesar 2:1 bertujuan untuk mewakili kondisi optimal dalam proses reduksi silika menjadi silikon. Grafik hasil analisis FTIR dari sampel silikon ditunjukkan pada **Gambar 3**.

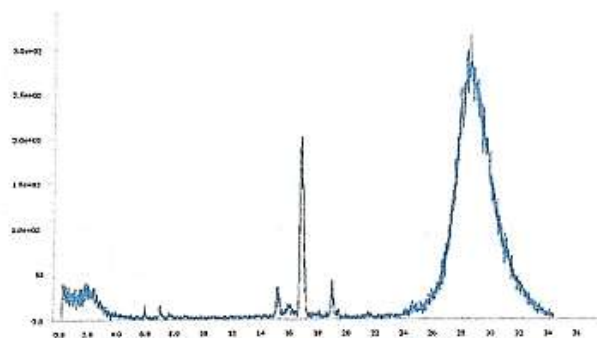


Gambar 3. Grafik Analisa FTIR

3.3 Analisis XRF

Analisis X-Ray Fluorescence (XRF) digunakan dalam penelitian ini untuk mengetahui komposisi unsur kimia dari padatan hasil reduksi silika. Teknik ini termasuk dalam metode karakterisasi kuantitatif yang sangat efektif untuk menentukan kandungan unsur-unsur logam dalam suatu sampel padat tanpa perlu melarutkannya. Prinsip kerja XRF adalah mendeteksi emisi sinar-X sekunder yang dipancarkan oleh unsur-unsur dalam sampel saat terkena paparan sinar-X primer, kemudian mengidentifikasinya berdasarkan energi karakteristik yang dipancarkan.

Sampel yang dianalisis menggunakan XRF merupakan produk hasil reduksi silika dengan rasio Mg: SiO_2 sebesar 2:1, yang sebelumnya telah menunjukkan hasil paling optimal berdasarkan massa silikon yang dihasilkan. Untuk analisis ini digunakan sebanyak 5 gram sampel silikon hasil reduksi. Hasil analisis XRF dari sampel silikon ditampilkan pada **Gambar 4**.

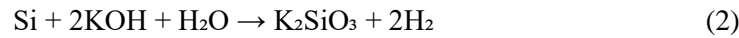


Gambar 4. Grafik Analisis XRF

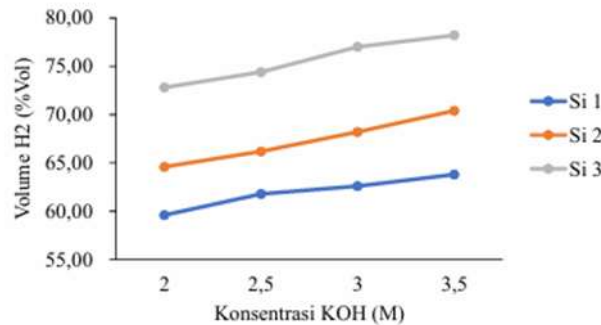
Hasil analisis XRF menunjukkan bahwa silikon menjadi unsur dominan dengan konsentrasi sebesar 23.957 ppm, yang menegaskan keberhasilan proses reduksi silika menjadi silikon elemental. Analisis ini juga bermanfaat untuk memastikan tidak adanya sisa unsur lain seperti Mg, Al, atau logam berat dalam jumlah signifikan, sehingga menandakan bahwa proses pemisahan dan pemurnian silikon telah berlangsung secara optimal. Temuan ini sejalan dengan penelitian Pratiwi dkk. [20], yang menyatakan bahwa dominasi unsur Si pada hasil XRF mencerminkan keberhasilan konversi silika menjadi silikon dengan tingkat kemurnian tinggi, terutama setelah melalui tahap pemurnian dan pencucian.

3.4 Produksi Gas Hidrogen

Analisis hasil produksi gas hidrogen dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi konsentrasi KOH terhadap volume gas hidrogen yang dihasilkan. Data hasil percobaan menunjukkan adanya hubungan yang jelas antara peningkatan konsentrasi KOH dengan volume gas hidrogen yang dihasilkan. Gas hidrogen dihasilkan melalui reaksi antara silikon dengan KOH dan air, sebagaimana ditunjukkan Persamaan (2):



Grafik pada **Gambar 5** menunjukkan bahwa volume gas H_2 meningkat dengan peningkatan konsentrasi KOH. Pada rasio 2:1, volume meningkat dari 72,80% pada 2 M menjadi 78,20% pada 3,5 M. Pola serupa terlihat pada rasio lainnya. Hal ini membuktikan bahwa jumlah ion OH^- yang lebih tinggi mendorong reaksi lebih cepat dan menghasilkan lebih banyak gas H_2 .



Gambar 5. Pengaruh Konsentrasi KOH Terhadap Volume Gas H2

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan rasio $\text{Mg}:\text{SiO}_2$ berbanding lurus dengan massa silikon yang dihasilkan, dan hal ini berimplikasi langsung pada peningkatan volume gas H_2 . Dengan kata lain, semakin besar massa silikon yang diperoleh, maka semakin besar pula volume gas hidrogen yang terbentuk. Temuan ini konsisten dengan penelitian Wang dkk. [21], yang menegaskan bahwa kombinasi silikon dalam jumlah lebih banyak dengan larutan basa yang lebih kuat mampu meningkatkan volume hidrogen secara signifikan.

Data hasil percobaan memperlihatkan pola kenaikan yang jelas. Pada rasio $\text{Mg}:\text{SiO}_2$ sebesar 1:1, volume hidrogen meningkat dari 59,60% menjadi 63,80%. Pada rasio 1,5:1, volume gas hidrogen naik dari 64,60% menjadi 70,40%. Sementara itu, pada rasio 2:1, volume gas hidrogen bertambah dari 72,80% menjadi 78,20% seiring dengan peningkatan konsentrasi KOH dari 2 M hingga 3,5 M. Kecenderungan ini menunjukkan bahwa selain konsentrasi KOH, kualitas silikon hasil reduksi juga memiliki peran penting dalam meningkatkan reaktivitas terhadap larutan basa, sehingga menghasilkan volume gas hidrogen yang lebih optimal.

4. Kesimpulan

Setelah mempertimbangkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa meningkatnya rasio magnesium (Mg) dibandingkan dengan silika (SiO_2) memberikan dampak positif terhadap hasil reduksi menjadi silikon. Rasio yang lebih tinggi dapat menghasilkan massa silikon yang lebih banyak. Ini menunjukkan bahwa Mg berperan sebagai reduktor yang efektif dalam reaksi metalotermal, dengan massa silikon yang diperoleh sebesar 21,83 g pada rasio 1:1 dan meningkat menjadi 24,71 g pada rasio 2:1. Selain itu, volume gas hidrogen (H_2) yang dihasilkan juga meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi KOH, karena ion OH^- dalam larutan KOH berperan dalam mempercepat reaksi antara silikon dan air sehingga menghasilkan H_2 dalam jumlah lebih besar. Volume tertinggi tercatat sebesar 78,20% pada rasio $\text{Mg}:\text{SiO}_2$ 2:1 dengan konsentrasi KOH 3,5 M.

5. Saran

Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan melakukan variasi rasio $\text{Mg}:\text{SiO}_2$ dan konsentrasi KOH yang lebih tinggi guna memperoleh efisiensi maksimum dalam proses reduksi dan produksi gas hidrogen. Penelitian lanjutan juga perlu mempertimbangkan pengaruh parameter lain seperti suhu dan waktu reaksi.

6. Daftar Pustaka

- [1] R. Shwetharani, D. H. Nagaraju, R. Geetha Balakrishna, and V. Suvina, "Hydrogenase enzyme-like nanocatalysts FeS₂ and FeSe₂ for molecular hydrogen evolution reaction," *Materials Letters*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.03.131>
- [2] Directorate General of New & Renewable Energy and Energy Conservation, Ministry of Energy and Mineral Resources, Indonesia, "Indonesia's National Hydrogen Strategy," 2024.
- [3] Y. Wahyono, H. Sutanto, and E. Hidayanto, "Produksi gas hidrogen menggunakan metode elektrolisis dari elektrolit air dan air laut dengan penambahan katalis NaOH," *Youngster Physics Journal*, vol. 6, no. 4, pp. 353–359, 2017. Available : <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/bfd/article/view/18760>
- [4] Munir, M. Mustaghfirin, R. A. Heriyansyah, N. Tamimah, and E. Novianarenti, "Pengaruh penambahan katalis KOH, NaCl, dan NaOH terhadap performa hydrogen generator untuk proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)," *Jurnal Teknologi Maritim*, vol. 8, no. 1, 2024. <https://doi.org/10.35991/jtm.v8i1.49>
- [5] A. Nazilah, N. Andarini, and T. Haryati, "Isolasi silikon (Si) dari abu terbang (fly ash) batubara dengan metode metalotermal," *Prosiding Seminar Nasional Kimia*, Universitas Jember, pp. 7–9, 2015.
- [6] M. Meilianti, S. Maliki, and M. M. Alfisyahri, "Karakteristik biopelet berbasis cangkang kelapa sawit dan batubara sub-bituminous untuk energi terbarukan," *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, vol. 5, no. 3, pp. 272–282, 2025, doi: 10.29103/cejs.v5i3.21836.
- [7] E. Nurmahdani, R. Junaidi, and I. Purnamasari, "Silikon hasil reduksi silika dari fly ash batubara untuk pembuatan hidrogen," *Jurnal Kinetika*, vol. 13, no. 3, pp. 20–25, 2022.
- [8] D. Azzahra, R. Junaidi, and F. HC, "Production of hydrogen gas from beverage cans waste aluminum powder using KOH catalyst," *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*, vol. 2, no. 8, pp. 355–361, 2022, doi: 10.52436/1.jpti.200.
- [9] S. Khairi, E. Erlindawati, T. Kuseno, M. Marcelina, and M. K. Syafrianto, "Hidrogen dari reaksi pemecahan air menggunakan aluminium dengan katalis basa abu tandan kosong sawit," *JC-T (Journal Cis-Trans)*, vol. 5, no. 2, pp. 1–7, 2021, doi: 10.17977/um0260v5i22021p001.
- [10] F. K. Setiawan, R. Junaidi, and L. Ekawati, "Pembuatan gas hidrogen dari silika hasil ekstraksi bottom ash batubara dan serbuk aluminium limbah kaleng minuman," 2024. <https://doi.org/10.14710/jebt.2024.24342>
- [11] R. Wahyudi, R. Junaidi, and E. Dewi, "Pembuatan nanosilikon dari abu cangkang kelapa sawit sebagai katalis untuk proses hidrogenasi air," *Innovative: Journal of Social Science Research*, vol. 3, no. 5, pp. 901–912, 2023.
- [12] Masrofah, Isma, J. P. Gede, and R. Cianjur. "Kajian pemanfaatan silika dari sekam padi dalam pengolahan limbah tekstil." *Jurnal Media Teknik dan Sistem Industri 1* (2017): 60-65.
- [13]. Ayuningtyas, Utari, et al. "Pemanfaatan Fly Ash Dan Bottom Ash Sebagai Material Konstruksi Ramah Lingkungan Dalam Rangka Mendukung Kriteria Bangunan Hijau." *Proceedings Of National Colloquium Research And Community Service*. Vol. 6. 2022.
- [14] N. Andarini, T. Haryati, and R. Yulianti, "Pemurnian silikon (Si) hasil reduksi silika dari fly ash batubara," *Berkala Sainstek*, vol. 6, no. 1, p. 49, 2018. <https://doi.org/10.19184/bst.v6i1.7933>
- [15] V. Nurmazaya et al., "Analisis pengaruh suhu dan waktu pada pembentukan silika dari sekam padi menggunakan larutan KOH," *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, vol. 2, no. 5, pp. 68–78, 2022.
- [16] A. A. Rizky et al., "Pengaruh variasi suhu dan lama waktu pembakaran terhadap hasil sintesis silika dari daun bambu menggunakan metode sol-gel," *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, vol. 2, no. 5, pp. 107–116, 2022.
- [17] F. F. Hanum, A. Rahayu, and I. Hapsauqi, "The comparison effect of NaOH and KOH as the leaching solution for silica from two different coal fly ashes," *Indonesian Journal of Chemical Research*, vol. 10, no. 1, pp. 27–31, 2022.
- [18] Belton, David J., Olivier Deschaume, and Carole C. Perry. "An overview of the fundamentals of the chemistry of silica with relevance to biosilicification and technological advances." *The FEBS journal* 279.10 (2012): 1710-1720.
- [19] H. J. Kim, D. H. Lee, Y. J. Kim, and S. J. Park, "Synthesis of porous silicon using magnesiothermic reduction method and its electrochemical performance," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 29, pp. 223–228, 2015.

-
- [20] M. Pratiwi, L. Kalsum, and R. Rusdianasari, "Extraction and characterization of silicon dioxide from coal fly ash as counter electrode material in DSSCs," *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, vol. 27, no. 9, pp. 419–425, 2024.
- [21] Wang, Owen. "Rapid hydrogen generation from aluminum-water system using synthesized aluminum hydroxide catalyst." *International Journal of Chemical Engineering and Applications* (2015).