E-ISSN : 2988-1986
Saintek
https://ejournal.warunayama.org/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin

Volume 10 No 5 Tahun 2025

PEMBUATAN GAS HIDROGEN DARI SERBUK ALUMINIUM DENGAN KATALIS KOH DI CATALYTIC BATCH LOOP CIRCULATION REACTOR

Paramita Yudi*[1], Robert Junaidi[2], Dilia Puaspa[3]
[1 2 3]Industrial Chemical Technology Dempartment, Politeknik Negeri Sriwijaya

Jl. Srjaya Negara Bukit Besar, Palembang, 30139, South Sumatera, Indonesia

Author's e-mail: robert.junaidi@polsri.ac.id

Abstrak

Peningkatan permintaan energi global dan dampak negatif ketergantungan pada bahan bakar fosil telah mendorong eksplorasi sumber energi alternatif yang berkelanjutan. Hidrogen muncul sebagai energi terbarukan yang menjanjikan karena efisiensi tinggi dan menghasilkan emisi minimal berupa uap air. Di Indonesia, konsumsi gas hidrogen tahun 2023 mencapai 1,75 juta ton per tahun dengan mayoritas digunakan untuk produksi urea dan amonia, namun masih bersumber dari gas alam. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh variasi konsentrasi katalis kalium hidroksida (KOH) dan massa serbuk aluminium terhadap pembentukan gas hidrogen menggunakan sistem Catalytic Batch Loop Circulation Reactor yang sederhana dan aplikatif. Metode penelitian menggunakan desain eksperimental dengan parameter terkontrol, meliputi variasi massa aluminium (15, 20, 25, dan 30 gram), konsentrasi KOH (4, 4,5, dan 5 M), suhu konstan 90°C, dan waktu reaksi 15-25 menit. Hasil penelitian menunjukkan korelasi positif signifikan antara konsentrasi KOH dan volume gas hidrogen yang dihasilkan, dengan perolehan optimal mencapai 79,6% vol H_2 pada kondisi konsentrasi KOH 5 M, massa aluminium 30 gram, durasi reaksi 25 menit, dan suhu 90°C. Peningkatan massa aluminium juga berkontribusi positif terhadap produksi hidrogen, meskipun pertambahannya tidak selalu linier dan bergantung pada ketersediaan ion hidroksida (OH^-). Temuan ini memvalidasi mekanisme reaksi $2Al + 2KOH + 6H_2O \rightarrow 2K[Al(OH)_4] + 3H_2$, di mana ion OH^- berperan krusial dalam melarutkan film oksida pelindung aluminium. Penelitian ini membuka peluang aplikasi praktis dalam bidang energi terbarukan dan produksi hidrogen berkelanjutan di skala laboratorium maupun industri kecil. Rekomendasi untuk penelitian lanjutan mencakup investigasi mendalam tentang pembentukan endapan $Al(OH)_3$, optimalisasi rasio volume-massa, serta eksplorasi skala-up ke level semi-pilot dan material katalis alternatif untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan dan sustainability sistem.

***Kata kunci**: Aluminium, Energi Terbarukan, Gas Hidrogen, Katalis Kalium Hidroksida, Reactor Batch*

Article History
Received: Oktober 2025
Reviewed: Oktober 2025
Published: Oktober 2025

Plagiarism Checker No 754
Prefix DOI : Prefix DOI : 10.8734/Kohesi.v1i2.365
Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

1. INTRODUCTION

Dalam beberapa tahun terakhir, peningkatan permintaan energi global telah mendorong berbagai negara untuk mengeksplorasi sumber energi alternatif yang berkelanjutan. Meskipun terdapat upaya signifikan untuk beralih ke sumber terbarukan, ketergantungan ekonomi global terhadap bahan bakar fosil masih sangat tinggi, sehingga menimbulkan dampak lingkungan yang merugikan (Azzahra, 2022). Pencemaran atmosfer yang melanda banyak wilayah di seluruh dunia sebagian besar berasal dari emisi pembakaran bahan bakar konvensional, yang berkontribusi pada fenomena kabut asap dan pembentukan hujan asam. Dalam konteks ini, hidrogen muncul sebagai alternatif energi yang menjanjikan karena memiliki keunggulan berupa efisiensi energi yang tinggi dan menghasilkan emisi minimal, yaitu hanya berupa uap air sebagai produk sampingnya(Smith, 1981).

Sebagai unsur kimia paling sederhana dan paling melimpah di planet Bumi, hidrogen memberikan peluang besar untuk dikembangkan melalui berbagai teknologi produksi, termasuk metode berbasis biomassa, pemisahan dan dekomposisi molekul air, serta reformasi dari sumber-sumber bahan bakar konvensional. Pada tingkat produksi global, sekitar 97% dari seluruh hidrogen masih dihasilkan melalui bahan bakar fosil menggunakan teknik reformasi uap dari gas alam, pemrosesan fraksi hidrokarbon ringan, dan gasifikasi batu bara. Namun demikian, beberapa metode alternatif seperti gasifikasi materi organik, dekomposisi termal metana, dan elektrolisis air telah menjadi pilihan yang terus dikembangkan (Bow et al., 2021). Di tingkat nasional, khususnya Indonesia, konsumsi gas hidrogen pada tahun 2023 mencapai 1,75 juta ton setiap tahunnya, dengan mayoritas produksi masih bersumber dari gas alam. Data menunjukkan bahwa 88% dari total hidrogen yang dikonsumsi diaplikasikan untuk produksi urea, 4% untuk pembuatan amonia, dan 2% ditujukan untuk sektor industri pengilangan minyak bumi.Pengembangan metode produksi hidrogen berbasis logam aktif, khususnya aluminium, telah menarik perhatian berbagai peneliti karena potensinya yang besar dan kemudahan penerapannya. Ketika aluminium direaksikan dengan larutan basa kuat seperti kalium hidroksida dalam lingkungan berair, reaksi spontan akan terjadi menghasilkan gas hidrogen yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar dalam sel bahan bakar aluminium-alkalin-udara, menawarkan solusi energi yang ramah lingkungan. Penelitian sebelumnya oleh (Chang et al., 20216) telah mendemonstrasikan bahwa dengan menggunakan natrium hidroksida sebagai katalis, peningkatan konsentrasi larutan alkalin menyebabkan peningkatan proporsional dalam volume gas hidrogen yang dilepaskan. Studi tersebut melakukan pengujian dengan variasi masa logam dari 0,5 gram hingga 2 gram, serta variasi konsentrasi dari 2N hingga 6N, mengungkapkan bahwa katalis berfungsi memfasilitasi reaksi dan pembentukan kompleks aluminium, yang mengakibatkan terlepasnya gas hidrogen.

Dalam riset yang dilakukan oleh (Daryanto et al., 20216) produksi gas hidrogen memanfaatkan logam aluminium dengan kalium hidroksida sebagai agen katalitik dengan konsentrasi berkisar 1-2,5 M dan massa logam 2-3 gram. Hasil kajian menunjukkan bahwa efisiensi optimal tercapai pada konsentrasi 2,5 M dengan hasil sebesar 5,88 ppm. Sebaliknya, penelitian (Manurung et al., 2010) membuktikan bahwa kalium hidroksida menunjukkan performa lebih superior dibandingkan natrium hidroksida dalam meningkatkan keluaran gas hidrogen, menghasilkan $2{,}140 \times 10^{-4}$ mol pada konsentrasi 1,0 M, sementara natrium hidroksida pada konsentrasi sama hanya menghasilkan $1{,}683 \times 10^{-4}$ mol. Penelitian-penelitian tersebut memberikan dasar teoritis yang kuat bahwa pemilihan jenis dan konsentrasi katalis merupakan faktor krusial dalam mengoptimalkan proses produksi hidrogen.

Studi lebih lanjut oleh (Fadel et al., 2019) menunjukkan bahwa penggunaan nanosilikon atau serbuk aluminium dengan konsentrasi katalis yang bervariasi dapat meningkatkan efisiensi produksi secara signifikan. Namun, pendekatan tersebut melibatkan bahan tambahan atau peralatan yang kompleks, sehingga kurang praktis untuk diterapkan di tingkat pendidikan maupun industri kecil. Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk mengembangkan metode yang lebih sederhana, ekonomis, dan aplikatif tanpa melibatkan bahan tambahan yang sulit diperoleh, dengan fokus pada penggunaan serbuk aluminium murni dan variasi konsentrasi katalis kalium hidroksida.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, pertanyaan penelitian yang hendak dijawab adalah: (1) Bagaimana pengaruh perubahan konsentrasi larutan kalium hidroksida terhadap tingkat pembentukan gas hidrogen? dan (2) Bagaimana pengaruh perubahan massa serbuk aluminium terhadap intensitas dan laju reaksi pembentukan gas hidrogen?. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengetahui pengaruh variasi massa aluminium terhadap kemampuan pembentukan gas hidrogen pada kondisi reaksi yang terkontrol, dan (2) menganalisis pengaruh variasi konsentrasi katalis terhadap kecepatan dan intensitas proses reaksi pembentukan gas hidrogen.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi berupa data empiris mengenai pengaruh variasi massa logam dan konsentrasi katalis terhadap efisiensi produksi gas hidrogen menggunakan prosedur sederhana yang dapat diterapkan di laboratorium pendidikan maupun industri kecil, serta menjadi acuan bagi pengembangan metode pengukuran visual yang praktis dan efisien dalam mengevaluasi proses pembentukan gas hidrogen secara real-time.

2. MATERIAL AND METHODS

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di fasilitas laboratorium Politeknik Negeri Sriwijaya dengan durasi pelaksanaan selama satu bulan penuh. Kegiatan penelitian utama, yang meliputi seluruh rangkaian percobaan reaksi dan pengumpulan data primer, dijadwalkan berlangsung pada periode Juni hingga Juli 2025. Analisis mendalam terhadap semua hasil percobaan yang diperoleh juga dilakukan pada rentang waktu yang sama, memastikan konsistensi dalam interpretasi data eksperimental. Selain itu, pengumpulan informasi sekunder melalui metode literatur diperoleh dari berbagai sumber rujukan *online* dan publikasi ilmiah terakreditasi untuk mendukung kerangka teori penelitian.

Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan rangkaian peralatan laboratorium standar untuk memfasilitasi reaksi kimia dan pengukuran hasil. Peralatan utama mencakup beaker kaca dengan kapasitas 50 mL, 100 mL, dan 1.000 mL sebanyak satu set lengkap; dua unit *magnetic stirrer* untuk pengadukan merata; satu unit *hot plate* untuk pengaturan suhu; gelas ukur dengan volume 50 mL dan 100 mL masing-masing berjumlah dua buah; labu ukur 100 mL untuk persiapan larutan yang akurat; neraca analitik berkalibrasi untuk penimbangan presisi bahan baku; pipet ukur standar; bola karet untuk manipulasi pipet; kaca arloji untuk penutup wadah; spatula berkualitas laboratorium sebanyak dua buah; pengaduk kaca sebanyak dua unit; kertas saring nomor 42 untuk filtrasi sebanyak tiga lembar; *Erlenmeyer* dengan kapasitas 100 mL, 500 mL, dan 1.000 mL masing-masing tiga buah; termometer untuk pemantauan suhu reaksi; corong kaca untuk proses penuangan; dan *portable multi gas detector* untuk analisis kualitatif gas yang dihasilkan. Bahan kimia yang digunakan dalam penelitian terdiri dari tiga komponen utama: serbuk

aluminium murni sebagai bahan dasar reaktan; air suling (*aquadest*) sebagai pelarut; dan kalium hidroksida (*potassium hydroxide*, KOH) sebagai agen katalis yang mempercepat reaksi kimia.

Rancangan Penelitian

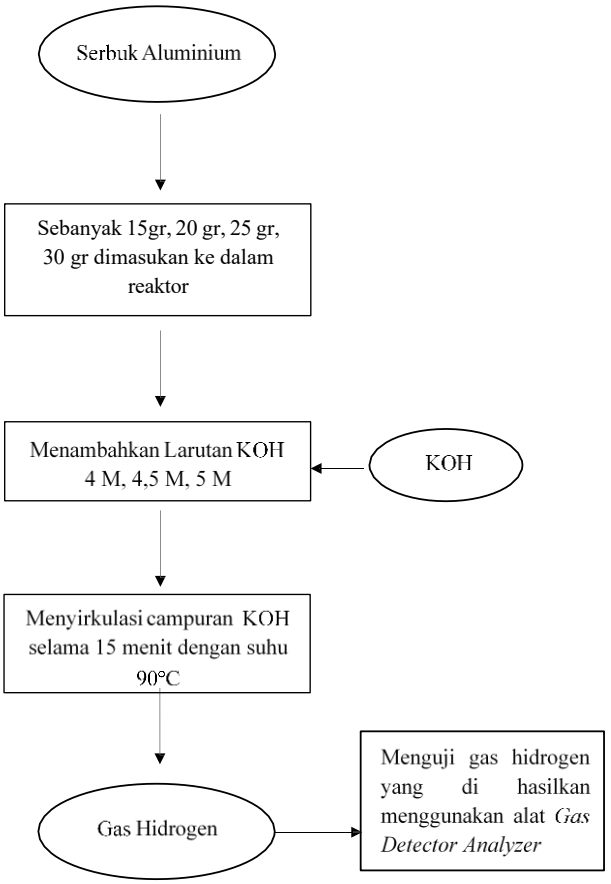
Strategi penelitian dirancang dengan sistem variabel terkendali untuk menentukan pengaruh parameter operasional terhadap produksi gas hidrogen. Dalam desain eksperimental ini, parameter tetap ditetapkan meliputi durasi reaksi sebesar 15 menit dan suhu operasional konstan 90°C untuk memastikan konsistensi lintas semua skenario percobaan. Sebaliknya, dua variabel bebas dimanipulasi secara sistematis: pertama, massa logam aluminium divariasikan dalam empat tingkatan berbeda yaitu 15 gram, 20 gram, 25 gram, dan 30 gram untuk mengukur efek kuantitas bahan baku; kedua, konsentrasi larutan KOH ditetapkan pada tiga level berbeda mencakup 4 M, 4,5 M, dan 5 M untuk mengevaluasi pengaruh kepekatan katalis terhadap efisiensi reaksi.

Prosedur Penelitian Fase Persiapan Limbah Logam: Serbuk aluminium ditimbang dengan akurat menggunakan neraca analitik sesuai dengan variasi massa yang telah ditentukan (15 g, 20 g, 25 g, 30 g), selanjutnya muatan tersebut dimasukkan ke dalam bejana reaktor yang telah disiapkan sebelumnya.

Fase Pembuatan Larutan Katalis: Tiga larutan katalis dengan konsentrasi berbeda disiapkan secara terpisah dengan prosedur identik. Untuk persiapan larutan 4 M, sebanyak 56,11 gram KOH ditimbang dengan cermat, dilarutkan dalam air suling, kemudian dipindahkan ke *volumetric flask* 250 mL hingga mencapai garis tanda. Untuk larutan 4,5 M, sebanyak 63,12 gram KOH dilarutkan dengan metode yang sama dalam volume akhir 250 mL. Untuk larutan konsentrasi tertinggi 5 M, sebanyak 70,14 gram KOH diproses dengan prosedur serupa.

Fase Produksi Gas Hidrogen: Serbuk aluminium dengan massa sesuai variasi dimasukkan ke dalam reaktor yang telah disiapkan. Volume tetap 500 mL larutan KOH dengan konsentrasi yang sesuai ditambahkan ke dalam reaktor. Sistem pemanas diatur untuk mencapai dan mempertahankan suhu 90°C sepanjang reaksi. Kantong penampung (*urine bag*) dipasang pada saluran keluaran reaktor untuk mengakumulasikan gas hidrogen yang terbentuk. Reaksi dibiarkan berlangsung selama durasi tetap 15 menit. Siklus percobaan ini diulang untuk masing-masing kombinasi parameter konsentrasi katalis (4 M, 4,5 M, 5 M).

Fase Analisis Gas Hidrogen: Sampel gas hidrogen yang tertampung dalam kantong dianalisis menggunakan alat *portable gas detector analyzer* untuk mengidentifikasi komposisi dan kemurnian gas yang dihasilkan dari setiap kondisi eksperimental.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3. RESULTS AND DISCUSSIONS
Hasil

Karakterisasi dan Pengukuran Kandungan Gas Hidrogen

Investigasi eksperimental yang telah diselesaikan menghasilkan data komprehensif mengenai konsentrasi gas hidrogen melalui penggunaan perangkat *Multi Gas Detector Analyzer* di fasilitas Laboratorium Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya. Pengukuran dilakukan dengan memanfaatkan variasi sistematis dua parameter utama, yakni konsentrasi katalis kalium hidroksida (KOH) dan massa sampel aluminium (Al). Prosedur ini dirancang untuk mengidentifikasi pengaruh masing-masing variabel terhadap keberhasilan pembentukan gas hidrogen dan efisiensi proses.

Rangkaian percobaan dilaksanakan dengan mengontrol beberapa faktor penting termasuk durasi reaksi, suhu medium reaksi, dan kondisi operasional reaktor. Setiap kombinasi parameter diamati secara teliti untuk mendokumentasikan perubahan konsentrasi gas yang dihasilkan. Hasil pengukuran diekspresikan dalam dua satuan berbeda, yaitu ppm (*parts per million*) dan persentase volume (% vol), memungkinkan interpretasi multi-perspektif terhadap data yang diperoleh.

Tabel 1. Analisis Kandungan Gas Hidrogen (Menggunakan *Multi Gas Detector Analyzer)*

No	KOH (M)	Al (g)	Waktu (menit)	Suhu (˚C)	ppm	H_2 (% vol)
1	4	15	-	61.6	308	-
2	4	20	15	90	315	63
3	4	20	25	90	310	62
4	4	30	-	90	330	66
5	4.5	15	-	-	342	68.4
6	4.5	20	15	90	355	71
7	4.5	20	25	90	368	73.6
8	4.5	30	-	90	361	72.2
9	5	15	-	-	374	74.8
10	5	20	15	90	388	77.6
11	5	20	25	90	383	76.6
12	5	30	-	90	398	79.6

Analisis dan Interpretasi Data Pengukuran

Data yang dipresentasikan menunjukkan pola signifikan yang mengindikasikan pengaruh kuat dari konsentrasi katalis terhadap kuantitas gas hidrogen yang dihasilkan. Observasi pertama yang menonjol ialah peningkatan progresif dalam persentase volume hidrogen seiring dengan elevasi konsentrasi KOH dari 4 M menjadi 5 M. Pada konsentrasi KOH sebesar 4 M, persentase hidrogen yang terukur berkisar antara 62–66% vol. Ketika konsentrasi dinaikkan menjadi 4.5 M, rentang hasil meningkat menjadi 68.4–73.6% vol. Selanjutnya, pada konsentrasi KOH tertinggi yakni 5 M, perolehan maksimal mencapai 79.6% vol, mengindikasikan korelasi positif antara konsentrasi katalis dan produksi hidrogen. Aspek kedua yang perlu diperhatikan melibatkan pengaruh massa sampel aluminium. Data menunjukkan bahwa peningkatan massa aluminium dari 15 g menjadi 30 g berkontribusi pada akumulasi total gas yang lebih substansial. Sebagai ilustrasi, pada konsentrasi KOH tetap 5 M, massa 15 g menghasilkan 74.8% vol, sementara masa 30 g mencapai 79.6% vol, mendemonstrasikan efek positif dari peningkatan jumlah bahan baku.

Parameter temporal juga menunjukkan relevansi terhadap kinerja sistem. Pada durasi reaksi 25 menit dengan kondisi konsentrasi KOH 4.5 M dan massa Al 20 g, persentase hidrogen tercatat 73.6% vol, melampaui hasil pada waktu 15 menit yang hanya mencapai 71% vol. Fenomena ini mengisyaratkan bahwa perpanjangan periode reaksi memfasilitasi konversi bahan baku yang lebih optimal, meskipun peningkatan bersifat incremental. Pengukuran suhu operasional pada 90˚C secara konsisten menunjukkan performa superior dibandingkan kondisi dengan suhu lebih rendah. Hal ini mengidentifikasikan bahwa elevasi temperatur lingkungan reaktor meningkatkan energi kinetik sistem, mempercepat laju reaksi antara aluminium dan katalis, dan menghasilkan produksi hidrogen yang lebih berlimpah.

Signifikasi Temuan Penelitian

Kesimpulan dari analisis data memvalidasi efektivitas sistem reaktor sirkulasi loop batch dalam mengkonversi serbuk aluminium menjadi hidrogen gas dengan pemanfaatan katalis KOH. Kondisi optimal yang tereksplorasi menunjukkan bahwa kombinasi konsentrasi KOH tinggi (5 M), massa aluminium yang cukup (30 g), waktu reaksi perpanjangan (25 menit), dan suhu elevasi (90˚C) menghasilkan produktivitas

maksimal pada 79.6% vol. Temuan ini membuka peluang aplikasi praktis dalam konteks energi terbarukan dan sistem produksi hidrogen berkelanjutan di skala laboratorium maupun industrial.

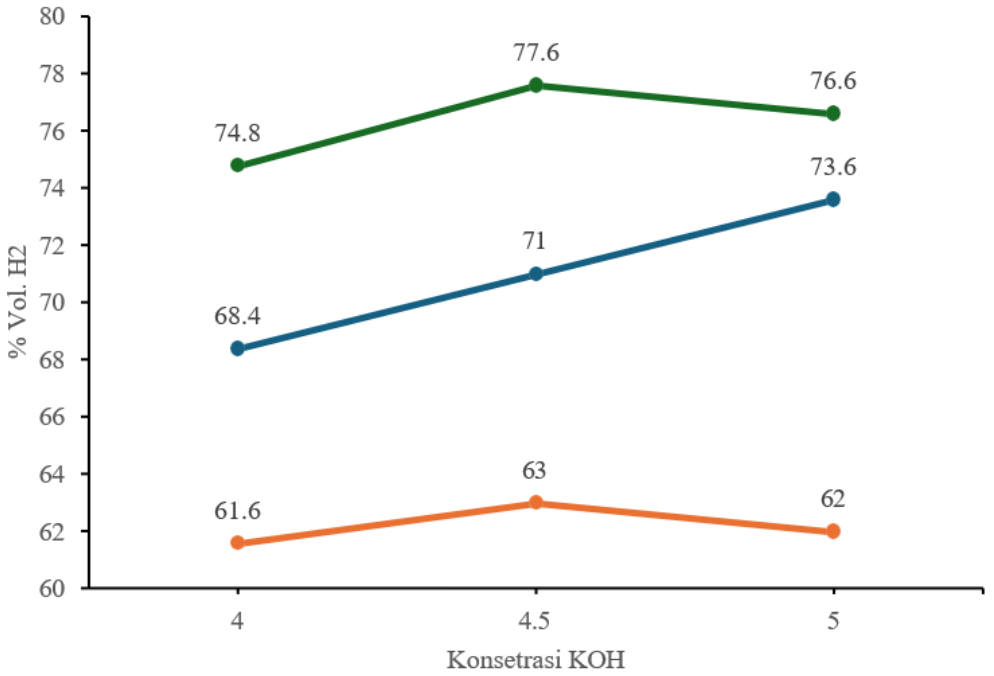
Diskusi & Pembahasan

Dampak Variasi Kepekataan KOH terhadap Pembentukan Gas Hidrogen

Penelitian ini mengungkapkan bahwa tingkat konsentrasi dari pelarut kalium hidroksida memberikan pengaruh yang signifikan dalam menentukan kuantitas gas hydrogen yang dilepaskan selama proses kimia berlangsung. Analisis data empiris (Tabel 4.2) memperlihatkan pola peningkatan yang konsisten pada kadar kandungan hydrogen seiring dengan kenaikan daya kerja pelarut dari satuan 4 M hingga mencapai 5 M. Ketika media reaksi memiliki tingkat kepekatannya 4 M, perolehan volume hidrogen mencapai jangkauan 61,6% sampai dengan 66%, kemudian melompat signifikan menjadi 68,4%–73,6% pada saat konsentrasi dinaikkan ke level 4,5 M, dan mencapai puncaknya sebesar 79,6% pada kondisi 5 M. Peran larutan KOH dalam sistem ini berfungsi sebagai medium basa alkali yang mengakselerasi interaksi antara logam aluminium dengan pelarut air, khususnya melalui mekanisme peluruhan film pelindung oksida yang melapisi permukaan logam. Spesi kimia bermuatan negatif hidroksida (OH^-) yang berasal dari disosiasi KOH memicu pembentukan kompleks ionik $[Al(OH)_4]^-$ dan membebaskan gas hydrogen dengan skema reaksi berikut:

$$2Al + 6H_2O + 2OH^- \rightarrow 2[Al(OH)_4] + 3H_2$$

Pengamatan ini sejalan dengan hasil penelitian terdahulu yang melaporkan bahwa tersedianya ion OH^- dalam jumlah berlimpah akan mempercepat proses disagregasi logam dan memperbesar jumlah hidrogen yang terbentuk (Numahdani, 2022). Kehadiran pelarut basa yang kuat juga memperpanjang periode reaktivitas permukaan logam karena terus-menerus mengerosi lapisan oksida pasif yang kontinyu terbentuk. Meskipun demikian, pada keadaan di mana konsentrasi mencapai level yang sangat tinggi, pengendapan senyawa $Al(OH)_3$ berpotensi mengganggu laju difusi zat pereaksi dalam larutan. Dalam jangkauan konsentrasi yang diterapkan dalam penelitian ini (4–5 M), kondisi penghambatan tersebut masih belum menjadi faktor pembatas utama. Secara keseluruhan, kecenderungan yang diamati menunjukkan bahwa semakin tinggi tingkat konsentrasi KOH yang digunakan, semakin besar pula volume gas hydrogen yang berhasil dihasilkan. Efisiensi optimal dicapai pada kondisi KOH 5 M, yang membuktikan bahwa parameter ini merupakan titik keseimbangan ideal untuk produksi hydrogen menggunakan kombinasi aluminium dan medium basa kuat.



Gambar 2. Grafik Hubungan Antara Konsentrasi KOH Terhadap Volume H_2

Gambar 2 menyajikan visualisasi korelasi antara tingkat konsentrasi larutan KOH (4 M, 4,5 M, dan 5 M) dan volume gas hidrogen yang dilepaskan (dinyatakan dalam %vol H_2) dari proses reaksi antara logam aluminium dan pelarut aqueous. Setiap garis dalam grafik tersebut merepresentasikan kuantitas massa logam yang dimulai dari 15 g, 20 g, 25 g, hingga 30 g. Secara umum, visualisasi data menunjukkan hubungan positif langsung antara peningkatan kepekatannya KOH dengan pertambahan volume hidrogen yang terlepas (Azzahra et al., 2022). Mekanisme di balik fenomena ini berhubungan dengan peran medium KOH sebagai pelarut basa kuat yang menyuplai ion hidroksida (OH^-) dalam konsentrasi tinggi. Spesi ionik ini memiliki fungsi esensial dalam melarutkan film oksida pasif yang tersusun dari aluminium oksida (Al_2O_3), lapisan yang secara natural mengendap di permukaan logam. Apabila lapisan protektif ini tidak dapat larut, maka area permukaan logam tidak akan mengalami reaksi lebih lanjut dengan pelarut water (Handayani, 2022). Persamaan kimia yang menggambarkan proses ini adalah:

$$2Al + 2KOH + 6H_2O \rightarrow 2K[Al(OH)_4] + 3H_2$$

Persamaan tersebut menjelaskan bagaimana spesies OH^- bekerja secara sinergis dengan pelarut aqueous untuk melarutkan logam aluminium dan membebaskan gas hydrogen sebagai produk dominan. Dengan menghadirkan kuantitas ion OH^- yang memadai, laju pembentukan kompleks aluminat dipercepat dan pelepasan hydrogen sebagai hasil utama ditingkatkan (Bolt et al.,). Ketika media reaksi berada pada tingkat konsentrasi 4 M, perolehan gas yang terbentuk masih dikategorikan relatif terbatas. Sebagai contoh, penggunaan 15 g logam aluminium hanya menghasilkan 61,6% hydrogen. Meskipun massa logam dinaikkan hingga 30 g, perolehan gas hanya meningkat menjadi 66%, yang menunjukkan kenaikan yang tidak proporsional. Fenomena ini mengindikasikan bahwa ketersediaan ion OH^- pada tahap konsentrasi ini belum mencukupi untuk melarutkan keseluruhan zona aktif logam. Pada tingkat kepekatannya 4,5 M, perubahan volume gas menjadi lebih terlihat jelas. Volume hydrogen naik dari 68,4% pada 15 g logam menjadi 73,6% pada 25 g, namun mengalami penurunan ringan

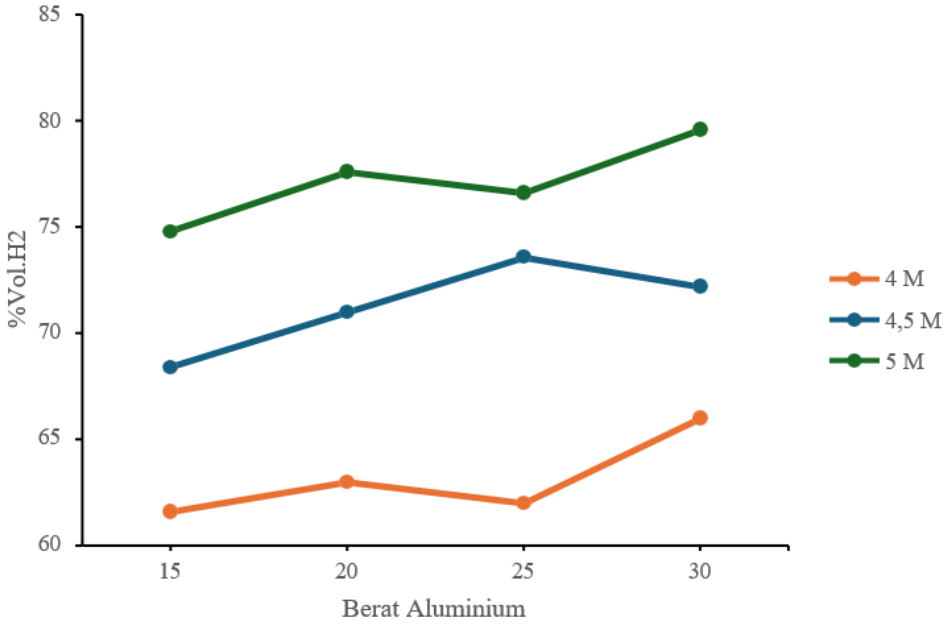
di 30 g menjadi 72,2%. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada tahap kepekatannya ini, proses reaksi mulai berjalan dengan efektivitas yang lebih baik, karena ketersediaan ion OH^- sudah memadai untuk melarutkan sebagian besar wilayah permukaan logam (Shimelev, 2016).

Konsentrasi 5 M menampilkan hasil terbaik, dengan perolehan hydrogen mencapai titik maksimal 79,6% pada masa logam 30 g. Angka ini tertinggi dari keseuruhan eksperimen, dan memvalidasi bahwa medium basa yang sangat pekat mampu mempercepat reaksi dan menghasilkan hydrogen dalam jumlah maksimum. Proses reaksi berlangsung dengan laju lebih cepat, dan logam dapat bereaksi dengan cakupan lebih menyeluruh karena tidak lagi terhalang film oksida (Qamar et al., 2022). Ketersediaan ion OH^- yang melimpah juga meningkatkan probabilitas tumbukan efektif antar partikel reaktan, yang pada gilirannya mempercepat laju pembentukan gas. Namun, terdapat kecenderungan penurunan volume gas pada masa logam tertentu, terutama di 25 g. Pengamatan ini kemungkinan besar disebabkan oleh pengendapan $Al(OH)_3$ atau penurunan efisiensi transport ion OH^- akibat kejenuhan local (Bolt et al., 2021) . Apabila permukaan logam tertutup oleh produk samping ini, maka wilayah logam akan menjadi inaktif, dan efisiensi pelepasan gas menurun.

Pengaruh Variasi Massa Logam Aluminium terhadap Perolehan Gas Hidrogen

Proses pembentukan gas hydrogen melalui interaksi antara logam aluminium dan medium kalium hidroksida (KOH) merupakan bentuk transformasi kimia di mana logam aluminium mengalami disolusi dalam lingkungan basa sekaligus membebaskan gas hydrogen sebagai hasil akhir proses. Logam aluminium bertindak sebagai agen pereduksi yang bereaksi dengan pelarut aqueous dalam kondisi basa, menghasilkan kompleks ionik dan gas H_2. Secara teoritis, peningkatan jumlah massa logam yang ditambahkan ke dalam sistem reaksi akan memperbesar jumlah atom logam yang siap bereaksi, sehingga dapat meningkatkan volume hydrogen yang dilepaskan (Sharp et al,. 2001).

Selain pertimbangan kuantitatif, luas zona kontak antara logam padat dan medium cair juga berperan penting dalam menentukan kinetika reaksi. Pertambahan massa aluminium memungkinkan terbentuknya wilayah kontak yang lebih ekstensif terhadap larutan KOH, yang berakibat pada percepatan pembentukan kompleks ionik hidroksida dan pelepasan gas H_2 (Santoso er al., 2021). Akan tetapi, apabila pertambahan massa logam tidak diikuti dengan tingkat konsentrasi KOH yang memadai, maka dapat timbul situasi keterbatasan reaktan atau terbentuknya lapisan pengendapan pasif yang justru menghambat efektivitas proses reaksi. Dalam penelitian ini, variasi massa logam dilakukan dengan rentang 15 hingga 30 gram, sementara parameter operasional lainnya seperti suhu (90°C), durasi reaksi (15 menit), dan tingkat konsentrasi KOH dibuat konstan. Tujuan variasi ini ialah untuk mengamati efek langsung dari perubahan massa logam pada volume hydrogen yang dihasilkan, sehingga dapat diketahui sejauh mana pertambahan aluminium berdampak pada efisiensi keseluruhan proses.



Gambar 3. Grafik Hubungan Antara Berat Aluminium Terhadap Produk H_2

Visualisasi data dalam Gambar 3 menunjukkan relasi antara massa logam aluminium (15 g, 20 g, 25 g, dan 30 g) dan volume gas hydrogen yang dihasilkan, masing-masing pada tiga tingkatan kepekatannya larutan KOH (4 M, 4,5 M, dan 5 M). Data visual ini memperlihatkan bahwa pertambahan massa aluminium pada dasarnya menghasilkan efek positif terhadap kuantitas gas hydrogen yang terbentuk. Namun, besarnya peningkatan tersebut sangat bergantung pada intensitas atau daya kerja larutan KOH yang berfungsi sebagai medium reaksi (Huang et al., 20213). Secara akademis, semakin besar massa logam aluminium yang dimanfaatkan, maka semakin banyak pula atom-atom logam yang tersedia untuk mengalami reaksi. Interaksi utama dalam sistem ini melibatkan logam aluminium, air, dan ion hidroksida (OH^-) yang berasal dari disosiasi KOH, dengan skema reaksi:

$$2Al + 2KOH + 6H_2O \rightarrow 2K[Al(OH)_4] + 3H_2$$

Dari persamaan tersebut, terlihat bahwa logam aluminium menjalankan fungsi sebagai agen pereduksi yang melepaskan elektron dan bereaksi dengan pelarut aqueous dalam lingkungan basa alkali, menghasilkan kompleks ionik dan hydrogen gas (Azzahra et al., 2022). Secara logis, apabila massa aluminium ditingkatkan, maka potensi volume hydrogen yang terbentuk juga akan bertambah, dengan prasyarat bahwa ketersediaan basa (ion OH^-) dalam sistem tetap mencukupi. Namun dalam praktik eksperimental, pertambahan tidak selalu bersifat linier. Pada keadaan di mana kepekatannya KOH 4 M, peningkatan massa logam dari 15 g hingga 30 g hanya menaikkan volume gas hydrogen dari 61,6% menjadi 66%. Hasil ini mengkonfirmasi bahwa dalam medium dengan konsentrasi rendah, ketersediaan ion OH^- masih belum mencukupi untuk melarutkan seluruh zona permukaan logam secara optimal. Sejumlah area logam kemungkinan tetap dalam kondisi pasif karena tertutup lapisan oksida dan tidak berkontribusi pada pelepasan hydrogen. Penemuan ini konsisten dengan hasil investigasi peneliti sebelumnya yang menjelaskan bahwa ketidakcukupan ion OH^- akan menyebabkan penghambatan proses disolusi dan pembentukan produk gas (Harnoko, 2018). Pada tingkat kepekatannya 4,5 M, pertambahan volume gas menunjukkan kemiringan yang lebih tajam. Volume hydrogen meningkat dari 68,4% menjadi 72,2% seiring dengan pertambahan massa logam dari 15 g hingga 30 g. Observasi ini

mengindikasikan bahwa ketersediaan ion OH^- sudah cukup untuk bereaksi dengan hampir keseuruhan zona aktif logam. Sistem mulai memperlihatkan kinerja yang lebih efektif dalam hal disolusi logam dan pembentukan kompleks aluminat (Nauman, 2007). Hal ini menunjukkan bahwa keseimbangan antara kuantitas logam dan kekuatan medium basa sangat menentukan bagi efektivitas pembentukan hydrogen.

Efek paling signifikan teramati pada kondisi kepekatannya KOH 5 M. Volume hydrogen mencapai puncaknya pada angka 79,6% dengan menggunakan 30 g logam aluminium. Data ini menunjukkan bahwa hampir keseluruhan massa logam berhasil terkonversi melalui proses reaksi secara menyeluruh, dan kondisi ini mendekati titik optimalisasi system (Sitohang et al, 2019). Disamping ketersediaan ion OH^- yang sangat melimpah, suhu operasional 90°C juga turut memfasilitasi laju reaksi yang lebih tinggi dengan meningkatkan mobilitas partikel dalam sistem dan memperbesar probabilitas tumbukan antar spesies reaktan. Namun, terdapat pula penurunan ringan pada beberapa titik pengukuran, misalnya pada masa 25 g. Fenomena ini diduga disebabkan oleh pembentukan lapisan endapan $Al(OH)_3$ yang menghalangi kontak langsung antara logam padat dan medium cairan, atau adanya situasi kejenuhan konsentrasi ion OH^- di sekitar wilayah permukaan logam. Ketika permukaan tertutup oleh endapan, maka bagian interior logam tidak dapat mengalami reaksi dan efisiensi pun menurun. Pada masa logam yang sangat besar seperti 30 g, meskipun volume gas meningkat, viskositas medium larutan juga cenderung bertambah. Tingginya viskositas dapat memperlambat pergerakan ion OH^- menuju permukaan logam dan menurunkan efisiensi pembentukan hydrogen secara keseluruhan. Temuan ini sejalan dengan laporan peneliti terdahulu yang menyatakan bahwa dalam sistem reaksi heterogen, proporsi volume cairan terhadap masa padatan memiliki pengaruh signifikan pada efisiensi proses (Irankhah et al., 2018).

4. CONCLUSIONS

Penelitian ini telah berhasil mendemonstrasikan efektivitas sistem Catalytic Batch Loop Circulation Reactor dalam mengkonversi serbuk aluminium menjadi gas hidrogen dengan menggunakan katalis kalium hidroksida (KOH). Data komprehensif yang diperoleh melalui pengukuran Multi Gas Detector Analyzer mengkonfirmasi adanya korelasi positif yang signifikan antara ketiga parameter utama—konsentrasi KOH, massa aluminium, dan waktu reaksi—terhadap volume gas hidrogen yang dihasilkan. Kondisi optimal yang tereksplorasi mencapai produksi maksimal sebesar 79,6% vol H_2 dengan kombinasi konsentrasi KOH 5 M, massa aluminium 30 gram, durasi reaksi 25 menit, dan suhu operasional 90°C. Peran krusial ion hidroksida (OH^-) dalam melarutkan film oksida pelindung aluminium telah terbukti secara eksperimental, memvalidasi mekanisme reaksi $2Al + 2KOH + 6H_2O \rightarrow 2K[Al(OH)_4] + 3H_2$. Temuan ini membuka peluang signifikan untuk aplikasi praktis dalam bidang energi terbarukan dan sistem produksi hidrogen berkelanjutan.

Untuk penelitian lanjutan dan pengembangan aplikasi industrial, disarankan untuk melakukan investigasi lebih mendalam mengenai fenomena penurunan efisiensi pada kondisi tertentu, khususnya kemungkinan pembentukan lapisan endapan $Al(OH)_3$ dan kejenuhan ion OH^-. Selain itu, dilakukan optimalisasi rasio volume larutan terhadap massa padatan untuk mengatasi masalah viskositas dan difusi ion yang dapat menghambat proses reaksi. Penelitian skala-up ke level semi-pilot menggunakan reaktor dengan kapasitas lebih besar sangat direkomendasikan untuk memvalidasi konsistensi hasil dan mengevaluasi kelayakan ekonomi sistem. Terakhir, eksplorasi material katalis alternatif dan sumber bahan baku terbarukan perlu dilakukan untuk meningkatkan

efisiensi keseluruhan dan sustainability produksi hidrogen dalam konteks transisi energi global.

ACKNOWLEDGEMENTS

This section gives appreciation to individuals and organizations that provide assistance to the author. Acknowledgments to sponsors and financial support are also included in this section.

REFERENCES STYLE

[1] J. M. Smith, "Chemical Engineering Kinetics (3rd ed.)," *New York McGraw-Hill*, 1981.
[2] A. Bow, H. Park, and Y. Li, "Kinetics of Hydrogen Evolution from," 2021.
[3] R. Chang and K. Goldsby, "Chemistry (12th ed.)," *New York McGraw-Hill Educ.*, 2016.
[4] D. Christo, A. Harahap, and H. Daryanto, "Potensi Hidrogen sebagai Energi Masa Depan," *J. Energi dan Lingkung.*, vol. 4, no. 1, pp. 45–51, 2013.
[5] B. Manurung, "Aplikasi Aluminium dalam Kehidupan Sehari-hari," *J. Tek. Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 45–52, 2010.
[6] R. Fadel, "Kimia Unsur: Hidrogen," *J. Pendidik. Kim.*, vol. 10, no. 3, pp. 210–215, 2019.
[7] E. Nurmahdani, "Evaluasi Produksi Hidrogen Berbasis Limbah Padat Aluminium," *J. Teknol. Energi*, vol. 14, no. 1, pp. 55–63, 2022.
[8] I. Handayani, "Peran Katalis dalam Reaksi Kimia Industri," *J. Kim. Terap. Indones.*, vol. 5, no. 1, pp. 23–29, 2022.
[9] K. Tekade, N. Pednekar, and H. Bolt, "Comparative Analysis of Base," 2020.
[10] V. Shmelev, A. Tokarev, and V. Kuznetsov, "Potassium Hydroxide as Effective Catalyst for Hydrogen Generation," *J. Appl.*, 2016.
[11] A. Qamar, "Strategi dan Prospek Hidrogen Nasional," *J. Energi Indones.*, vol. 12, no. 2, pp. 97–105, 2022.
[12] N. Pednekar, K. Tekade, and H. Bolt, "Hydrogen Evolution from Metal– Base Reaction: A Review," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 3, pp. 3156–3168, 2021.
[13] L. Sharp, A. Jones, and H. Patel, "Water Chemistry: Physical and Chemical Properties," *London CRC Press*, 2001.
[14] E. Santosa, S. Hartini, and D. Putri, "Evaluasi Uji Nyala untuk Identifikasi Hidrogen," *J. Kim. dan Keselam.*, vol. 6, no. 2, pp. 73–79, 2021.
[15] Y. Huang, T. Zhang, and H. Li, "Effect of Particle Size on Hydrogen Yield from Aluminium–Water Reactions," *Int. J. Energy*, 2013.
[16] D. Azzahra, R. Junaidi, and F. HC, "Production of Hydrogen Gas from Beverage Cans Waste Aluminum Powder Using KOH . Catalyst," *J. Pendidik. dan Teknol. Indones.*, vol. 2, no. 8, pp. 355–361, 2022, doi: 10.52436/1.jpti.200.
[17] B. Harnoko, "Sifat-Sifat Fisik Aluminium dan Aplikasinya," *Bandung: Penerbit Polban*, 2018.
[18] E. B. Nauman, *Chemical Reactor Design, Optimization, and Scaleup: Second Edition*. 2007. doi: 10.1002/9780470282076.
[19] L. Sitohang, L. Hakim, and F. Hasfita, "Pemanfaatan Limbah Kaleng Minuman Aluminium Untuk Produksi Gas Hidrogen Menggunakan Katalis Kalium Hidroksida (Koh)," *J. Teknol. Kim. Unimal*, vol. 6, no. 1, p. 55, 2018, doi: 10.29103/jtku.v6i1.469.
[20] A. Irankhah, A. Naseri, and M. Zare, "Catalytic Effect of Alkali Hydroxides on Hydrogen Production," *Renew. Energy*, vol. 116, pp. 881–890, 2018.