



POTENSI PRODUKSI BIOHIDROGEN DARI LIMBAH BIOMASSA PADA PROSES PENCERNAAN ANAEROBIK

Bintang Sipartogi Panjaitan*, Linda Lestari, Radite Praeko Agus Setiawan, Armansyah Halomoan Tambunan

Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia

Article history

Diterima:

16 November 2021

Diperbaiki:

2 Desember 2021

Disetujui:

3 Desember 2021

Keyword

*Anaerobic digestion;
biohydrogen;
dark fermentation;
thermophilic*

ABSTRACT

The sustainability of hydrogen as an energy carrier depends on the production process and the source of raw materials. The choice of substrate in anaerobic digestion process plays an important role to maximize biohydrogen production because it depends on its availability and the composition of substrate. The purpose of this study is to design and construct a prototype reactor for biohydrogen production and to determine the potential of H₂ gas production from anaerobic digestion process. This study uses an experimental research method with three operating temperature variations in the reactor, at the range of thermophilic temperatures, i.e. 55°C, 60°C, and 65°C. The substrate used was POME and cow dung, and the process was conducted in 24 hours which is assumed to be the stage of non-methanogenic within the anaerobic process. From this research, the prototype of continuous stirred tank reactor (CSTR) in batch system was made from acrylic, with a capacity of 6 liters biomass waste. Using the reactor, total biohydrogen gas produced during 24 hours process with cow manure as substrate was 0,0932 gram at 55 °C; 0,0307 gram at 60 °C and 0,0797 gram at 65 °C. While, biohydrogen production using POME as substrate was 0,0645 gram at 55 °C; 0,1708 gram at 60 °C, and 0,0636 gram at 65 °C. These results indicate the potentiality of POME and cow manure to produce biohydrogen gas during anaerobic digestion process.

This is open access article under the CC-BY-SA license

* Penulis korespondensi

Email : bintangsipartogi13@gmail.com

DOI 10.21107/agrointek.v15i4.12480

PENDAHULUAN

Pemanfaatan sumber daya energi terbarukan yang bersih diperlukan untuk mengganti penggunaan bahan bakar fosil serta mengatasi permasalahan lingkungan yang ditimbulkan. Bioetanol, biobutanol, biodiesel dan biohidrogen merupakan bahan bakar alternatif yang layak dibandingkan dengan bahan bakar berbasis karbon (Carere *et al.*, 2008). Hidrogen dipilih sebagai energi bersih atau *zero emission fuel* karena limbah hasil dari proses pembakaran hidrogen merupakan air. Di samping itu, hidrogen memiliki energi yang cukup tinggi sebesar 122 kJ/g, dimana 2,75 kali lebih besar dari bahan bakar hidrokarbon (Jung *et al.*, 2011).

Keberlanjutan hidrogen sebagai sumber daya energi bergantung pada proses produksi dan sumber bahan baku (fosil atau terbarukan). Secara komersial, hidrogen telah dihasilkan dari gas alam (48%), minyak bumi (30%) oleh proses reformasi *steam*, gasifikasi batu bara (18%) dan elektrolisis air (4%) , namun proses tersebut membutuhkan intensitas energi yang tinggi dan menggunakan sumber energi tak terbarukan dalam proses pembentukannya. Upaya produksi hidrogen yang berkelanjutan harus menghindari atau meminimalkan emisi CO₂. Produksi hidrogen secara biologis lebih ramah lingkungan, dan membutuhkan energi yang lebih rendah dibandingkan dengan metode saat ini seperti *steam reforming* dari hidrokarbon dan elektrolisis air (Kapdan and Kargi, 2006).

Di antara semua metode biologis, fermentasi gelap adalah proses yang paling sederhana untuk menghasilkan gas biohidrogen karena tidak memerlukan energi eksternal berupa sumber cahaya dan dapat dijalankan dengan biaya yang minim (Sreela-Or *et al.*, 2011). Fermentasi gelap memiliki tingkat produksi dan kapasitas pengolahan yang lebih tinggi dalam memanfaatkan limbah organik. Selain itu teknologi reaktor yang dibutuhkan tergolong sederhana (Hallenbeck dan Ghosh, 2009). Produksi biohidrogen menggunakan metode fermentasi gelap memiliki kesamaan proses dengan pencernaan anaerobik dimana hidrogen merupakan produk perantara pada produksi biogas. Namun proses dipertahankan pada tahap asetogenesis dengan perlakuan kondisi lingkungan tertentu untuk mencegah pertumbuhan bakteri metanogen, sehingga proses metanogenesis tidak dapat berlangsung. Hal ini

dilakukan untuk mencegah terjadinya penggunaan H₂ oleh bakteri metanogen untuk proses konversi CO₂ dan gas sisa tahap acetogenesis menjadi CH₄.

Pembentukan biohidrogen terbagi menjadi tiga tahapan, yaitu tahap hidrolisis dimana polimer organik terdegradasi oleh enzim menjadi senyawa yang sederhana (monomer). Selanjutnya senyawa sederhana diolah menjadi asam volatil (asetat, propionat, butirrat), H₂, dan CO₂ selama tahap asidogenesis. Asam volatil dioksidasi dalam tahapan asetogenesis menjadi asetat, H₂ dan CO₂ (Madigan dan Martinko, 2009). Mikroorganisme yang berperan dalam proses pencernaan anaerobik ialah bakteri anaerob. Bakteri anaerob akan mengkonsumsi senyawa organik untuk menghasilkan H₂, CO₂, dan asam organik (Kothari *et al.*, 2012). Bakteri tersebut memiliki kemampuan untuk membentuk endospora yang tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrim dibandingkan dengan bakteri metanogen (Sung dan Liu, 2003).

Parameter operasi pada kondisi lingkungan terkendali selama proses produksi biohidrogen membantu membatasi bakteri pengonsumsi biohidrogen di dalam reaktor. Kondisi operasi bioreaktor seperti suhu, pH dan tekanan parsial H₂ berpengaruh terhadap metabolisme dan pertumbuhan bakteri penghasil biohidrogen. pH dan suhu operasional adalah faktor yang menentukan jalur metabolisme optimum sintesis hidrogen, penghambatan proses konsumsi hidrogen, dan mempengaruhi aktivitas enzim (Zhu *et al.*, 2009). pH sangat penting untuk membatasi bakteri metanogen yang aktif pada rentang pH 6,3 hingga 7,8 (Pan *et al.*, 2008). Sedangkan perlakuan suhu termofilik (50-70°C) diketahui dapat meningkatkan potensi laju produksi gas hidrogen (Bartacek *et al.*, 2007). Suhu yang lebih tinggi dapat menghambat konsumsi H₂ oleh bakteri metanogen (Chong *et al.*, 2009). Dalam proses pencernaan anaerobik, tekanan parsial H₂ dan CO₂ dikurangi oleh bakteri metanogen untuk dikonversi menjadi CH₄ (Park *et al.*, 2010). Peningkatan tekanan parsial hidrogen di dalam reaktor dapat menghambat produksi H₂, sehingga diperlukan upaya pengumpulan fase gas yang dihasilkan selama proses fermentasi gelap berlangsung.

Pemilihan substrat memiliki peranan penting dalam proses fermentasi gelap, baik dalam hal memaksimalkan hasil biohidrogen atau dalam ekonomi proses (Ghimire *et al.*, 2015). Meskipun beberapa substrat sangat efisien dan efektif

sebagai sumber karbon untuk proses produksi biohidrogen, namun masih diperlukan substrat yang memiliki kesesuaian dengan proses tersebut. Limbah padat organik (lumpur, sisa makanan, kotoran ternak) memiliki potensi besar untuk produksi biohidrogen, terutama karena faktor ketersediaan dan biaya yang murah (Monlau *et al.*, 2015). Berdasarkan ketersediaannya, sumber substrat baru perlu diidentifikasi dan dianalisis untuk melihat potensi produksi biohidrogen yang dimiliki. Penelitian ini akan mengkaji potensi biohidrogen dari substrat berupa limbah cair pabrik kelapa sawit yaitu *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dan kotoran ternak (sapi). Eksplorasi tersebut didukung dengan kandungan senyawa organik pada substrat yang dapat dimanfaatkan oleh bakteri anaerob penghasil biohidrogen sebagai sumber makanan. Selain itu telah terdapat bakteri anaerob alamiah dari kotoran sapi dan POME, sehingga kehadiran mikroba ini membantu menciptakan lingkungan yang menguntungkan dalam proses produksi biohidrogen.

Penelitian ini memberikan gambaran umum proses produksi biohidrogen dari POME dan kotoran sapi, menggunakan proses pencernaan anaerobik dengan bioreaktor skala laboratorium yang dirancang. Proses pencernaan anaerobik yang digunakan untuk melihat potensi produksi biohidrogen, akan didekati dengan metode fermentasi gelap. Beberapa faktor / parameter fisiko-kimia yang perlu dipertimbangkan untuk proses produksi biohidrogen akan dibahas pada penelitian ini. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan prototipe bioreaktor dan mengetahui potensi produksi gas H₂ hasil proses pencernaan anaerobik.

METODE

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Pindah Panas dan Massa, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian IPB. Bahan baku berupa limbah kotoran sapi diambil dari Laboratorium Lapangan, Fakultas Peternakan IPB, dan limbah POME diperoleh dari Pabrik Kelapa Sawit Cikasungka PTPN VIII Bogor.

Penelitian ini menggunakan tiga varian suhu operasi pada rentang suhu termofilik, yaitu 55°C, 60°C, dan 65°C untuk setiap limbah biomassa. Parameter lain seperti pH, perlakuan awal limbah, dan tekanan parsial H₂ tidak diberlakukan untuk menyederhanakan proses penelitian. Proses dilakukan selama 24 jam yang dianggap sebagai waktu berlangsungnya tahapan non-methanogenik dari proses pencernaan anaerobik tersebut.

Rancang-bangun Bioreaktor

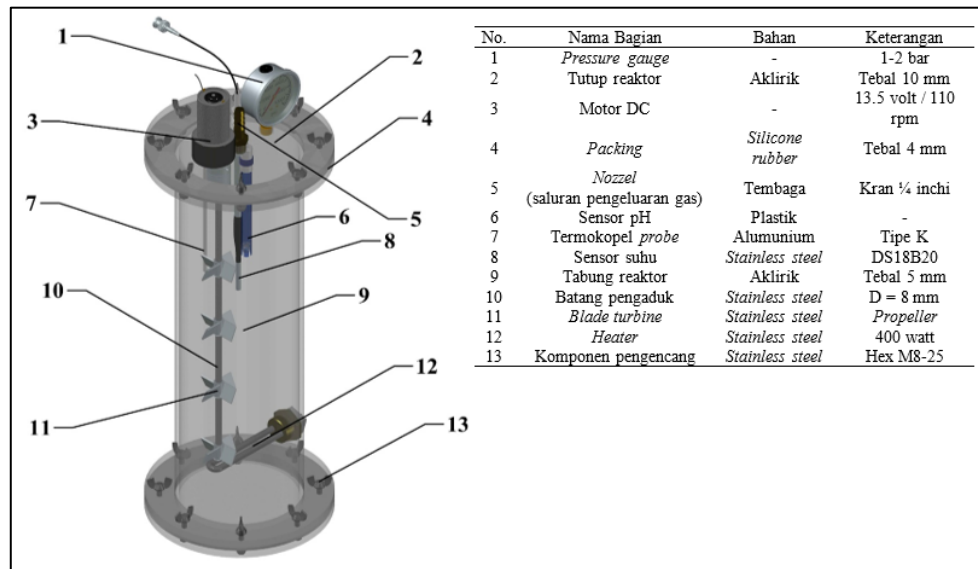
Prototipe bioreaktor skala laboratorium yang dirancang-bangun merupakan tipe *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR) dengan kapasitas 6 liter sistem *batch*. Perancangan bioreaktor tersebut disesuaikan dengan proses fermentasi gelap, namun tidak dipenuhinya syarat gelap dengan pengisolasian bioreaktor terhadap paparan cahaya. Jenis *impeller* yang digunakan pada *agitator* merupakan tipe *propeller* yang ukurannya didasarkan dari nilai viskositas masing-masing substrat, skala dan dimensi reaktor. Bioreaktor dilengkapi dengan elemen pemanas untuk kontrol suhu pada rentang termofilik. Rangkaian (*set up*) bioreaktor fermentasi gelap dapat dilihat pada Gambar 1.

Pengambilan dan Penyiapan Substrat

Kotoran sapi dan POME yang digunakan sebagai substrat diambil pada kondisi segar. Sampel POME diperoleh dari aliran berturbulensi pada saluran pipa pengeluaran pabrik sebelum limbah masuk ke *de-oiling pond*. POME segar dipersiapkan terlebih dahulu melalui proses penyaringan dan penimbangan, sedangkan limbah kotoran sapi dilengkapi dengan proses pengenceran (1:2).

Pengukuran Konsentrasi Gas H₂

Alat ukur gas hidrogen tipe PGAS-21-G digunakan untuk mengukur kandungan gas H₂ yang terhubung dengan bantuan selang ke bagian dalam reaktor. Alat ukur tersebut berkerja melalui bantuan pompa dengan debit 0,7 liter/menit untuk menghisap udara yang terdapat didalam reaktor. Konsentrasi H₂ dari total gas yang terhisap dalam waktu tertentu akan terukur dengan nilai ppm sebelum dibuang ke lingkungan.

Gambar 1 Rangkaian (*set up*) bioreaktor fermentasi

Analisis Data

Data yang diperoleh dari percobaan tersebut diolah dengan menggunakan integrasi numerik. Jumlah gas H₂ yang dihasilkan selama 24 jam dari proses pencernaan anaerobik berupa data konsentrasi gas H₂ (ppm) dan dikonversi ke satuan massa menggunakan persamaan berikut.

$$\sum m_g = f(x) \times M_r \times V_m \times Q$$

dimana,

$\sum m_g$ = Total produksi gas H₂ (gram)

$f(x)$ = Jumlah total gas H₂ (ppm.detik)

M_r = Berat molekul gas H₂ (gram/mol)

V_m = Volume molar gas ideal (22,4 liter/mol)

Q = Debit pompa GA (liter/menit)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancang-bangun Bioreaktor Anaerobik

Bioreaktor yang dirancang-bangun merupakan bioreaktor fermentasi gelap, tanpa pencegahan intrusi cahaya ruangan pada saat proses berlangsung. Bioreaktor tersebut berkerja dengan sistem batch berpengaduk kontinu (CSTR) seperti yang terlihat pada Gambar 1. Dinding bioreaktor terbuat dari bahan aklirik dengan ketebalan 0,5 cm, sehingga bioreaktor terpapar pada cahaya ruangan dengan intensitas cahaya rata-rata sebesar ± 557 lux pada siang hari dan ± 115 lux pada malam hari. Bioreaktor dirancang dengan kapasitas masukan limbah sebesar 6 liter. Bioreaktor tersebut dilengkapi dengan pengaduk (*agitator*), pemanas, *pressure gauge*, sensor suhu, sensor pH, dan terhubung dengan alat ukur gas H₂. Pengaduk yang digunakan merupakan bilah

propeller dengan kecepatan putar sebesar 110 rpm. Pengaduk diletakkan pada posisi *incline* pada bioreaktor untuk mencegah terjadinya efek *vortex* selama pengadukan. Sebanyak 4 buah bilah disusun secara berurutan dengan rentang ± 7 cm. Fungsi utama dari *agitator* untuk meratakan sebaran suhu didalam bioreaktor dan mencegah terjadinya pengendapan selama proses pencernaan anaerobik berlangsung.

Gambar 2 *Set Up* Bioreaktor Anaerobik

Suhu operasi dijaga tetap, menggunakan termostat untuk memutus dan menyambungkan arus listrik pada elemen pemanas sehingga suhu limbah berada pada rentang ± 1°C dari suhu yang ditetapkan seperti yang terlihat pada Gambar 2. Sensor suhu dan pH secara berdampingan masing-masing berada pada kedalaman 15 cm dan 10 cm dibawah permukaan cairan limbah sedangkan saluran hisap dari alat ukur gas H₂ diletakkan ditengah tutup bioreaktor. Sensor suhu dan pH akan mengukur perubahan temperatur dan derajat keasaman dari limbah setiap 3 detik selama proses

pencernaan anaerobik berlangsung. Penelitian ini menggunakan debit pompa *high* sebesar 0,7 liter/menit untuk setiap pengukuran.

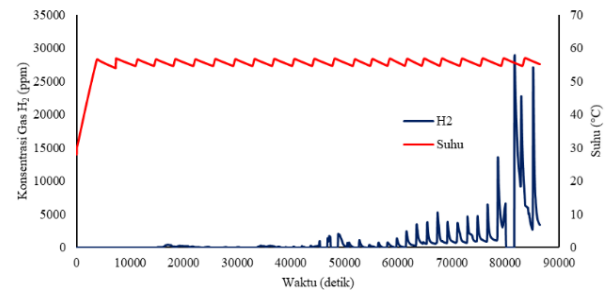
Kandungan gas hidrogen di dalam bioreaktor hasil dari proses pencernaan anaerobik limbah POME dan kotoran sapi akan diukur setiap 45 detik selama 24 jam yang ditunjukkan pada Gambar 2 hingga 13. Penelitian ini tidak memberikan perlakuan awal atau *pre-treatment* pada bahan baku seperti inokulasi bakteri, penambahan reaksi kimia, dan kontrol pH (derajat keasaman). Limbah dipertahankan sesuai keadaan semula limbah tersebut dihasilkan. Dapat diartikan proses pencernaan anaerobik yang berlangsung pada penelitian ini memanfaatkan bakteri alami penghasil biohidrogen yang sudah terdapat di dalam limbah sejak awal. Perlakuan suhu termofilik yang diberikan pada limbah akan mencegah perkembangan atau aktivitas bakteri metanogen untuk memulai tahap metanogenesis. Suhu termofilik memiliki potensi untuk mencapai hasil hidrogen yang lebih besar dan laju produksi hidrogen yang lebih tinggi daripada proses mesofilik (Bartacek *et al.*, 2007). Selain itu, suhu yang lebih tinggi dapat menghambat konsumsi H₂ oleh bakteri metanogen (Chong *et al.*, 2009).

Sebelum limbah dimasukkan ke dalam bioreaktor persiapan khusus diberlakukan untuk limbah kotoran sapi. Kotoran sapi diencerkan dengan perbandingan antara kotoran sapi dan air sebesar 1:2. Pengenceran tersebut dilakukan untuk memudahkan proses pengadukan kotoran sapi di dalam bioreaktor, sehingga perlakuan suhu yang diberikan dapat tersebar secara merata. Setelah proses pengenceran, limbah kotoran sapi akan disaring untuk memisahkan padatan berupa rumput dan serabut yang belum tercerna dengan sempurna oleh sapi. Penyaringan ini bertujuan untuk mengurangi jumlah padatan kasar yang dapat mengganggu proses pengadukan. Sedangkan untuk limbah POME hanya diperlukan proses penyaringan.

Potensi Produksi Gas Biohidrogen

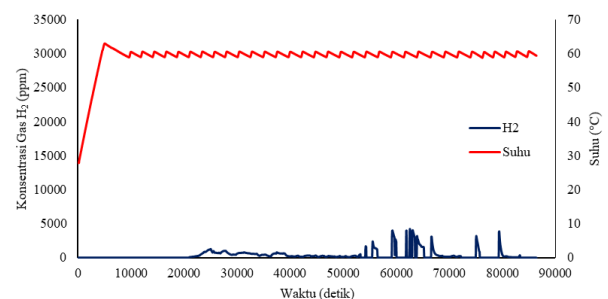
Hasil analisis data pengukuran produksi gas biohidrogen dari limbah kotoran sapi suhu 55°C pada Gambar 2 menunjukkan jumlah total gas biohidrogen yang dihasilkan selama 24 jam sebesar 89.454.660 ppm detik atau setelah dikonversi kedalam satuan massa diperoleh sebesar 0,0932 gram gas H₂. Limbah kotoran sapi yang telah diencerkan dengan massa campuran sebesar 3,918 Kg dan volum bioreaktor sebesar

0,006 m³, sehingga diperoleh densitas limbah sebesar 653 Kg/m³. Produksi gas biohidrogen pertama kali terukur pada detik ke-14.850 sebesar 5 ppm, sedangkan produksi biohidrogen terbesar selama proses pencernaan anaerobik tercatat pada detik ke-81.720 sebesar 28.960 ppm.



Gambar 3 Grafik produksi gas biohidrogen dari limbah kotoran sapi pada suhu 55°C

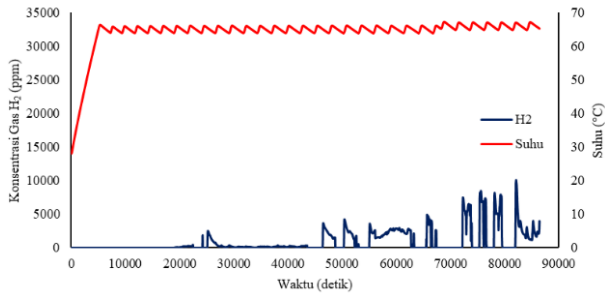
Hasil analisis data pengukuran produksi gas biohidrogen dari limbah kotoran sapi suhu 60°C pada Gambar 3 menunjukkan jumlah total gas biohidrogen yang dihasilkan selama 24 jam sebesar 29.516.310 ppm detik atau setelah dikonversi kedalam satuan massa diperoleh sebesar 0,0307 gram gas H₂. Limbah kotoran sapi yang telah diencerkan dengan massa campuran sebesar 3,982 Kg, sehingga diperoleh densitas limbah sebesar 663,667 Kg/m³. Produksi gas biohidrogen pertama kali terukur pada detik ke-20.700 sebesar 6 ppm, sedangkan produksi biohidrogen terbesar selama proses pencernaan anaerobik tercatat pada detik ke-62.550 sebesar 4.221 ppm.



Gambar 4 Grafik produksi gas biohidrogen dari limbah kotoran sapi pada suhu 60°C

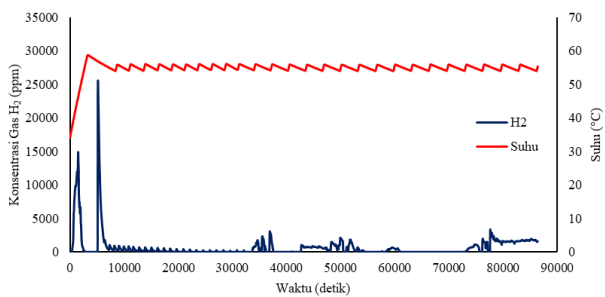
Hasil analisis data pengukuran produksi gas biohidrogen dari limbah kotoran sapi suhu 65°C pada Gambar 4 menunjukkan jumlah total gas biohidrogen yang dihasilkan selama 24 jam sebesar 76.543.110 ppm detik atau setelah dikonversi kedalam satuan massa diperoleh sebesar 0,0797 gram gas H₂. Limbah kotoran sapi yang telah diencerkan dengan massa campuran

sebesar 3,728 Kg, sehingga diperoleh densitas limbah sebesar 621,333 Kg/m³. Produksi gas biohidrogen pertama kali terukur pada detik ke-18.990 sebesar 8 ppm, sedangkan produksi biohidrogen terbesar selama proses pencernaan anaerobik tercatat pada detik ke-82.080 sebesar 10.086 ppm.



Gambar 5 Grafik produksi gas biohidrogen dari limbah kotoran sapi pada suhu 65°C

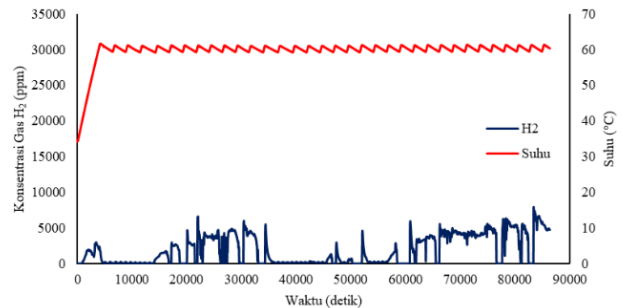
Hasil analisis data pengukuran produksi gas biohidrogen dari limbah POME suhu 55°C pada Gambar 5 menunjukkan jumlah total gas biohidrogen yang dihasilkan selama 24 jam sebesar 61.905.090 ppm detik atau setelah dikonversi kedalam satuan massa diperoleh sebesar 0,0645 gram gas H₂. Massa limbah POME yang digunakan sebesar 4,31 Kg, sehingga diperoleh densitas limbah sebesar 718,333 Kg/m³. Produksi gas biohidrogen pertama kali terukur pada detik ke-360 sebesar 104 ppm, sedangkan produksi biohidrogen terbesar selama proses pencernaan anaerobik tercatat pada detik ke-5.130 sebesar 25.579 ppm.



Gambar 6 Grafik produksi gas biohidrogen dari POME pada suhu 55°C

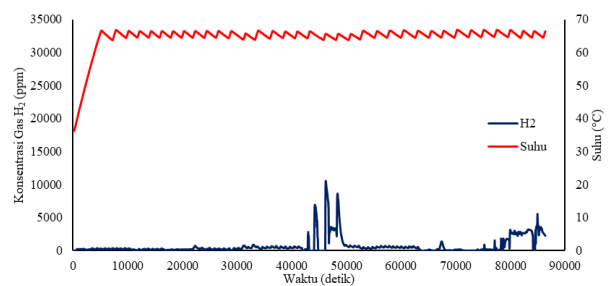
Hasil analisis data pengukuran produksi gas biohidrogen dari limbah POME suhu 60°C pada Gambar 6 menunjukkan jumlah total gas biohidrogen yang dihasilkan selama 24 jam sebesar 163.993.185 ppm detik atau setelah dikonversi kedalam satuan massa diperoleh sebesar 0,1708 gram gas H₂. Massa limbah POME yang digunakan sebesar 4,235 Kg, sehingga

diperoleh densitas limbah sebesar 705,833 Kg/m³. Produksi gas biohidrogen pertama kali terukur pada detik ke-810 sebesar 2 ppm, sedangkan produksi biohidrogen terbesar selama proses pencernaan anaerobik tercatat pada detik ke-83.430 sebesar 7.860 ppm.



Gambar 7 Grafik produksi gas biohidrogen dari POME pada suhu 60°C

Hasil analisis data pengukuran produksi gas biohidrogen dari limbah POME suhu 65°C pada Gambar 7 menunjukkan jumlah total gas biohidrogen yang dihasilkan selama 24 jam sebesar 61.094.115 ppm detik atau setelah dikonversi kedalam satuan massa diperoleh sebesar 0,0636 gram gas H₂. Massa limbah POME yang digunakan sebesar 4,261 Kg, sehingga diperoleh densitas limbah sebesar 710,167 Kg/m³. Produksi gas biohidrogen pertama kali terukur pada detik ke-450 sebesar 19 ppm, sedangkan produksi biohidrogen terbesar selama proses pencernaan anaerobik tercatat pada detik ke-46.215 sebesar 10.548 ppm.



Gambar 8 Grafik produksi gas biohidrogen dari POME pada suhu 65°C

Hasil tersebut menunjukkan bahwa limbah biomassa yang diproses dengan pencernaan anaerobik berpotensi menghasilkan gas biohidrogen. Pada penelitian ini proses pencernaan anaerobik yang digunakan didekati dengan metode fermentasi gelap, namun tidak dilakukan isolasi pada bioreaktor terhadap cahaya tempat pengambilan data berlangsung. Syarat gelap yang menjadi prinsip metode fermentasi

gelap yang digunakan tidak dipenuhi untuk melihat fenomena yang terjadi selama proses pencernaan anaerobik. Badan bioreaktor yang transparan memungkinkan terjadinya proses fotofermentasi akibat paparan cahaya tampak. Namun paparan cahaya tersebut tergolong fluktuatif karena tidak menjadi variabel kontrol pada penelitian ini sehingga sangat sulit untuk melihat pengaruhnya pada proses pencernaan anaerobik yang berlangsung.

Intensitas cahaya ruangan yang mengenai bioreaktor terukur dengan nilai rata-rata sebesar ± 557 lux pada siang hari dan ± 115 lux pada malam hari, nilai intensitas cahaya tersebut tergolong rendah dibandingkan dengan literatur yang diperoleh, untuk melakukan proses fotofermentasi (1500-6000 lux). Produksi hidrogen optimum secara fotofermentasi diperoleh pada 3000 lux, yang akan menurun pada intensitas cahaya > 5000 lux (Assawamongkholisiri dan Reungsang, 2015). Besarnya pengaruh cahaya pada penelitian ini belum bisa dipastikan, perlu dilakukan pengujian pada penelitian selanjutnya.

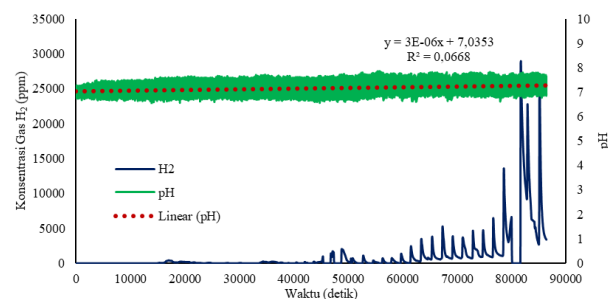
Data hasil pengukuran setiap limbah dengan perlakuan suhu yang berbeda tidak dapat dibandingkan satu sama lain, karena tidak dilakukan pengontrolan sejak awal proses terhadap kandungan komponen setiap limbah. Total produksi gas biohidrogen yang dihasilkan selama 24 jam proses pencernaan anaerobik menunjukkan hasil yang tergolong rendah. Dibandingkan dengan hasil perhitungan teoritis (stoikiometri) dapat dihasilkan gas H_2 sebesar 44,48 gram dengan asumsi kandungan glukosa (reaktan) pada limbah biomassa sebesar 1 Kg. Rendahnya hasil produksi gas biohidrogen tersebut dikarenakan belum tercapainya waktu total yang dibutuhkan pada proses pencernaan anaerobik untuk memproduksi gas biohidrogen. Limbah biomassa yang digunakan pada proses pencernaan anaerobik belum terproses seluruhnya. Sebagai contoh massa limbah POME dengan perlakuan suhu $55^\circ C$ hanya berkurang sebesar 111 gram dari 4,310 Kg limbah POME yang digunakan selama 24 jam proses pencernaan anaerobik. Selain itu terdapat juga pengaruh dari komposisi substrat dalam bentuk terlarut pada limbah biomassa kotoran sapi dan POME.

Waktu tunggu yang dibutuhkan untuk menghasilkan gas biohidrogen dari limbah kotoran sapi ± 300 menit, jauh lebih lama dibandingkan limbah POME yang hanya

membutuhkan waktu ± 5 menit sampai akhirnya dapat menghasilkan gas H_2 . Hal ini dikarenakan limbah kotoran sapi mengandung sejumlah komponen yang sulit terdegradasi seperti selulosa dan lignin, sehingga membutuhkan waktu yang lebih lama untuk terhidrolisis pada fase pertama (Li *et al.*, 2010). Lamanya waktu tunggu juga dipengaruhi oleh kandungan dan jenis bakteri penghasil biohidrogen yang terdapat pada limbah tersebut, sehingga diperlukan uji skala lab pada penelitian selanjutnya untuk melihat karakteristik limbah yang diuji dan jenis bakteri dominan yang terdapat di dalam limbah.

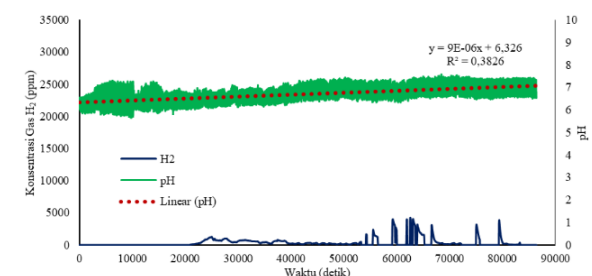
Perubahan pH Selama Proses Pencernaan Anaerobik

Hasil pengukuran pH yang terjadi selama 24 jam proses pencernaan anaerobik menggunakan kotoran sapi dengan suhu $55^\circ C$ pada Gambar 8 menunjukkan pH awal limbah sebesar 6,91 dengan nilai pH maksimum sebesar 7,6 dan nilai pH minimum sebesar 5,7 sedangkan rata-rata perubahan pH selama 24 jam sebesar $6,7 \pm 0,3$.



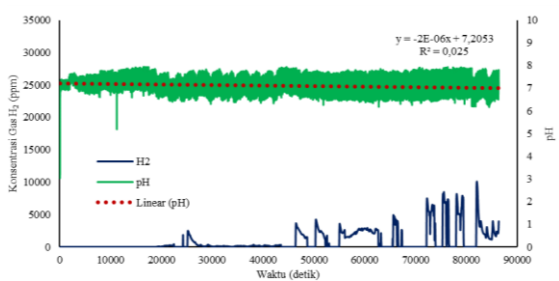
Gambar 9 Grafik pH limbah kotoran sapi pada suhu $55^\circ C$

Hasil pengukuran pH yang terjadi selama 24 jam proses pencernaan anaerobik menggunakan kotoran sapi dengan suhu $60^\circ C$ pada Gambar 9 menunjukkan pH awal limbah sebesar 6,48 dengan nilai pH maksimum sebesar 7,9 dan nilai pH minimum sebesar 6,6 sedangkan rata-rata perubahan pH selama 24 jam sebesar $7,2 \pm 0,4$.



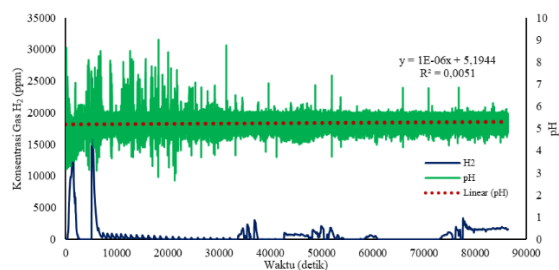
Gambar 10 Grafik pH limbah kotoran sapi pada suhu $60^\circ C$

Hasil pengukuran pH yang terjadi selama 24 jam proses pencernaan anaerobik menggunakan kotoran sapi dengan suhu 65°C pada Gambar 10 menunjukkan pH awal limbah sebesar 7,11 dengan nilai pH maksimum sebesar 7,9 dan nilai pH minimum sebesar 3,0 sedangkan rata-rata perubahan pH selama 24 jam sebesar $7,1 \pm 0,4$.



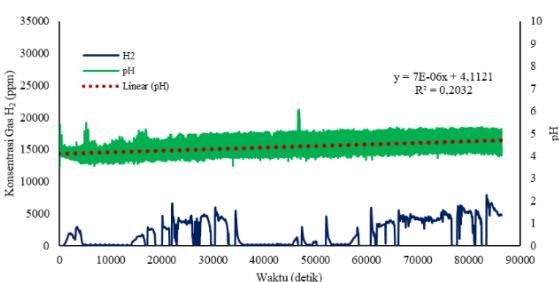
Gambar 11 Grafik pH limbah kotoran sapi pada suhu 65°C

Hasil pengukuran pH yang terjadi selama 24 jam proses pencernaan anaerobik menggunakan POME dengan suhu 55°C pada Gambar 11 menunjukkan pH awal limbah sebesar 4,51 dengan nilai pH maksimum sebesar 9,0 dan nilai pH minimum sebesar 2,7 sedangkan rata-rata perubahan pH selama 24 jam sebesar $5,2 \pm 0,4$.



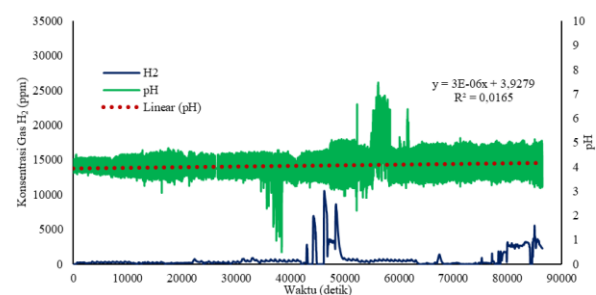
Gambar 12 Grafik pH POME pada suhu 55°C

Hasil pengukuran pH yang terjadi selama 24 jam proses pencernaan anaerobik menggunakan POME dengan suhu 60°C pada Gambar 12 menunjukkan pH awal limbah sebesar 4,55 dengan nilai pH maksimum sebesar 6,1 dan nilai pH minimum sebesar 3,6 sedangkan rata-rata perubahan pH selama 24 jam sebesar $4,4 \pm 0,4$.



Gambar 13 Grafik pH POME suhu 60°C

Hasil pengukuran pH yang terjadi selama 24 jam proses pencernaan anaerobik menggunakan POME dengan suhu 65°C pada Gambar 13 menunjukkan pH awal limbah sebesar 4,30 dengan nilai pH maksimum sebesar 7,5 dan nilai pH minimum sebesar 0,5 sedangkan rata-rata perubahan pH selama 24 jam sebesar $4,0 \pm 0,5$.



Gambar 14 Grafik pH POME pada suhu 65°C

Perubahan pH yang terjadi selama 24 jam proses pencernaan anaerobik menunjukkan nilai pH awal limbah POME lebih asam dibandingkan dengan limbah kotoran sapi pada suhu 55°C, 60°C, dan 65°C, hal tersebut sesuai dengan karakteristik limbah POME yang berada pada kisaran pH 3,8-5,0 (O-Thong *et al.*, 2008) sedangkan limbah kotoran sapi berada pada kisaran pH 7,1 (Chinwendu *et al.*, 2013).

Terjadinya fermentasi gelap pada proses pencernaan anaerobik dapat terlihat dengan adanya perubahan pH selama proses produksi bihidrogen. Dalam tahap acidogenesis proses pembentukan gas bihidrogen, asam volatil terbentuk sebagai produk samping metabolik. Produksi asam seperti asam asetat berlangsung secara terus menerus bersamaan dengan dihasilkannya gas hidrogen. Hal ini yang mendasari terjadinya perubahan pH yang fluktuatif selama proses pencernaan anaerobik berlangsung dan perubahan kondisi pH menjadi lebih asam.

Bakteri fermentatif tidak mampu mengurangi akumulasi asam sehingga menyebabkan penurunan pH yang cepat yang berakibat penghambatan produksi hidrogen oleh bakteri. pH yang sangat asam ($<4,0$) menyebabkan gangguan pemeliharaan sel dimana energi (ATP) untuk memproduksi bihidrogen akan digunakan untuk menjaga kesetimbangan pH (Zong *et al.*, 2009). Karena kekurangan ATP, aktivitas enzim seperti hidrogenase akan dihambat dalam menghasilkan hidrogen (Lay *et al.*, 2003). Saat produksi hidrogen terhambat, akan terbentuk

produk akhir seperti etanol, butanol dan asam laktat. Produk degradasi ini mengandung atom H tambahan yang tidak dibebaskan sebagai gas (Madigan dan Martinko 2009). Namun dengan dihasilkannya asam selama proses pencernaan anaerobik dapat membatasi pertumbuhan bakteri metanogen yang aktif dalam rentang pH 6,3 – 7,8 (Pan *et al.*, 2008). Kondisi asam pada limbah di dalam bioreaktor, menunjukkan adanya kemungkinan bahwa gas metan (CH₄) yang dihasilkan selama 24 jam proses pencernaan anaerobik masih cukup rendah atau tahap metanogenesis pada limbah belum dimulai, namun harus dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memastikannya besar konsentrasi gas metan yang terbentuk selama 24 jam.

Kondisi pH basa menghasilkan jeda panjang produksi biohidrogen karena adaptasi bakteri untuk kultur alkali (Zong *et al.*, 2009). Hal ini mempengaruhi waktu tunggu awal produksi H₂ yang dibutuhkan limbah kotoran sapi ± 300 menit, lebih lama dibandingkan limbah POME yang hanya membutuhkan waktu ± 5 menit. Sedangkan penurunan pH yang terlalu rendah dapat mengakibatkan pergeseran jalur metabolisme serta perubahan komunitas mikroba (Guo *et al.*, 2010). Periode singkat proses fermentasi gelap dengan sistem *batch* masih berada pada kondisi pH yang sesuai, sedangkan pada sistem kontinu dibutuhkan sistem pH terkontrol dengan nilai optimum untuk mempertahankan aktivitas bakteri penghasil gas biohidrogen.

KESIMPULAN

Prototipe bioreaktor dengan sistem *batch* berpengaduk kontinu berhasil dirancang dan dapat menghasilkan gas biohidrogen. Hasil analisis data menunjukkan jumlah total gas biohidrogen yang dihasilkan selama 24 jam dari limbah kotoran sapi adalah 0,0932 gram pada suhu 55°C; 0,0307 gram pada suhu 60°C dan 0,0797 gram pada suhu 65°C. Sedangkan untuk limbah POME diperoleh jumlah total gas biohidrogen sebesar 0,0645 gram pada suhu 55°C; 0,1708 gram pada suhu 60°C dan 0,0636 gram pada suhu 65°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa limbah POME dan kotoran sapi yang diproses dengan pencernaan anaerobik berpotensi menghasilkan gas biohidrogen.

DAFTAR PUSTAKA

Assawamongkholisiri, T., Reungsang, A., 2015. Photo-fermentational hydrogen production of *Rhodobacter* sp. KKU-PS1 isolated from

- an UASB reactor. *Electron. J. Biotechnol.* 18, 221–230. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2015.03.011>
- Bartacek, J., Zabranska, J., Lens, P.N.L., 2007. Developments and constraints in fermentative hydrogen production. *Biofuels, Bioprod. Biorefining.* <https://doi.org/10.1002/bbb.17>
- Carere, C.R., Sparling, R., Cicek, N., Levin, D.B., 2008. Third generation biofuels via direct cellulose fermentation. *Int. J. Mol. Sci.* <https://doi.org/10.3390/ijms9071342>
- Chinwendu, S., Chibueze, U., Tochukwu, E., 2013. Anaerobic Digester Considerations of Animal Waste. *Am. J. Biochem.* 2013, 93–96. <https://doi.org/10.5923/j.ajb.20130304.02>
- Chong, M.L., Sabaratnam, V., Shirai, Y., Hassan, M.A., 2009. Biohydrogen production from biomass and industrial wastes by dark fermentation. *Int. J. Hydrogen Energy.* <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.010>
- Ghimire, A., Frunzo, L., Pirozzi, F., Trably, E., Escudie, R., Lens, P.N.L., Esposito, G., 2015. A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: Process parameters and use of by-products. *Appl. Energy.* <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.045>
- Guo, X.M., Trably, E., Latrille, E., Carre, H., Steyer, J.P., 2010. Hydrogen production from agricultural waste by dark fermentation: A review. *Int. J. Hydrogen Energy* 35, 10660–10673. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.008>
- Hallenbeck, P.C., Ghosh, D., 2009. Advances in fermentative biohydrogen production: the way forward? *Trends Biotechnol.* <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.02.004>
- Jung, K.W., Kim, D.H., Kim, S.H., Shin, H.S., 2011. Bioreactor design for continuous dark fermentative hydrogen production. *Bioresour. Technol.* 102, 8612–8620. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.056>
- Kapdan, I.K., Kargi, F., 2006. Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme Microb. Technol.* 38, 569–582.

- <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.09.015>
- Kothari, R., Singh, D.P., Tyagi, V. V., Tyagi, S.K., 2012. Fermentative hydrogen production - An alternative clean energy source. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.002>
- Lay, J.J., Fan, K.S., Chang I, J., Ku, C.H., 2003. Influence of chemical nature of organic wastes on their conversion to hydrogen by heat-shock digested sludge. *Int. J. Hydrogen Energy* 28, 1361–1367. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(03\)00027-2](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(03)00027-2)
- Li, R., Chen, S., Li, X., 2010. Biogas production from anaerobic co-digestion of food waste with dairy manure in a two-phase digestion system, in: *Applied Biochemistry and Biotechnology*. pp. 643–654. <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8533-z>
- Monlau, F., Sambusiti, C., Ficara, E., Aboulkas, A., Barakat, A., Carrère, H., 2015. New opportunities for agricultural digestate valorization: Current situation and perspectives. *Energy Environ. Sci.* <https://doi.org/10.1039/c5ee01633a>
- O-Thong, S., Prasertsan, P., Intrasungkha, N., Dhamwichukorn, S., Birkeland, N.Kå., 2008. Optimization of simultaneous thermophilic fermentative hydrogen production and COD reduction from palm oil mill effluent by *Thermoanaerobacterium*-rich sludge. *Int. J. Hydrogen Energy* 33, 1221–1231. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.12.017>
- Pan, J., Zhang, R., El-Mashad, H.M., Sun, H., Ying, Y., 2008. Effect of food to microorganism ratio on biohydrogen production from food waste via anaerobic fermentation. *Int. J. Hydrogen Energy* 33, 6968–6975. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.130>
- Park, M.J., Jo, J.H., Park, D., Lee, D.S., Park, J.M., 2010. Comprehensive study on a two-stage anaerobic digestion process for the sequential production of hydrogen and methane from cost-effective molasses. *Renew. Energy* 35, 6194–6202. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.135>
- Sreela-Or, C., Imai, T., Plangklang, P., Reungsang, A., 2011. Optimization of key factors affecting hydrogen production from food waste by anaerobic mixed cultures, in: *International Journal of Hydrogen Energy*. pp. 14120–14133. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.04.136>
- Sung, S., Liu, T., 2003. Ammonia inhibition on thermophilic anaerobic digestion. *Chemosphere* 53, 43–52. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00434-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00434-X)
- Zhu, H., Parker, W., Basnar, R., Proracki, A., Falletta, P., Béland, M., Seto, P., 2009. Buffer requirements for enhanced hydrogen production in acidogenic digestion of food wastes. *Bioresour. Technol.* 100, 5097–5102. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.066>
- Zong, W., Yu, R., Zhang, P., Fan, M., Zhou, Z., 2009. Efficient hydrogen gas production from cassava and food waste by a two-step process of dark fermentation and photo-fermentation. *Biomass and Bioenergy* 33, 1458–1463. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.06.008>