



Kinerja dan Kinetika Produksi Biohidrogen secara *Batch* dari Sampah Buah Melon dalam Reaktor Tangki Berpengaduk

Febrina Sarlinda¹, Sarto², dan Muslikhin Hidayat²

¹Jurusan Kesehatan Lingkungan, Politeknik Kesehatan Tanjungkarang

²Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jl Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta, 55281

*Alamat korespondensi: febrina.sarlinda@mail.ugm.ac.id

(Submisi: 1 Maret 2018; Revisi: 14 Mei 2018; Penerimaan: 18 Mei 2018)

ABSTRACT

Melon fruit waste with high sugar and water content is potential as a substrate for hydrogen production by dark fermentation. This study investigated the performance of biohydrogen production from melon fruit waste in a stirred tank reactor with initial concentration of 13100 mg sCOD/L, in room temperature, initial pH of 7 and controlling final pH at 5.5 by adding NaOH. The fermentation was carried out for 24 hours. The value of pH, volatile solid (VS), soluble chemical oxygen demand (sCOD), volatile fatty acid (VFA), biogas volume, hydrogen content, and cell concentration was analyzed every hour to determine the performance of reactor. Hydrogen content reached 16.20% with hydrogen production rate (HPR) of 458.12 mL/L_{reaktor}/day in the standard temperature and pressure (STP) condition. Substrate consumption at the end of fermentation reached 24.61% of sCOD and 78.28% of VS. Metabolite products were dominated by acetate and butyrate with butyrate to acetate ratio of 7:6. The kinetic of product formation was evaluated by the kinetic model of Gompertz. Meanwhile the kinetics of cell growth was approximated by logistics model

Keywords: melon fruit waste, stirred tank reactor, HPR, kinetics

ABSTRAK

Sampah buah melon yang cukup melimpah dan kaya akan gula dan air sangat berpotensi sebagai substrat untuk produksi biohidrogen secara fermentasi gelap. Pada penelitian ini dipelajari kinerja produksi biohidrogen dari sampah buah melon menggunakan reaktor tangki berpengaduk. Konsentrasi awal substrat 13.100 mg sCOD/L pada suhu ruang, pH awal 7 dan dilakukan kontrol terhadap pH akhir fermentasi agar tidak turun lebih rendah dari pH 5,5 dengan penambahan NaOH. Fermentasi berlangsung selama 24 jam dan setiap jam dilakukan analisis terhadap pH, *volatile solid (VS)*, *soluble chemical oxygen demand (sCOD)*, *volatile fatty acid (VFA)*, volume biogas, kadar hidrogen dan konsentrasi biomassa untuk mengetahui kinerja reaktor. Kadar biohidrogen yang diperoleh sebesar 16,20% dengan laju produksi hidrogen sebesar 458,12 mL/L_{reaktor}/hari pada keadaan STP. Konsumsi substrat pada akhir fermentasi mencapai 24,61% sCOD dan 78,28% VS. Produk metabolit dominan adalah asetat dan butirir dengan ratio butirir per asetat sebesar 1,2. Kinetika pembentukan hidrogen dipelajari melalui model kinetika persamaan Gompertz. Sedangkan kinetika pertumbuhan sel didekati dengan model kinetika persamaan logistik.

Kata kunci: sampah buah melon, reaktor tangki berpengaduk, laju produksi hidrogen, kinetika

1. Pendahuluan

Salah satu komoditas buah yang cukup besar di Indonesia adalah melon (*Cucumis melo L.*). Menurut data statistik *Food and Agricultural Organization (FAO)* produksi melon secara global selalu meningkat dari tahun ke tahun. Pada tahun 2014 produksi melon dunia mencapai 29.626.335 ton, sedangkan produksi melon Indonesia mencapai 150.356 ton. Dengan memperhitungkan bahwa 10% dari total produksi buah akan menjadi sampah, potensi sampah dari buah melon sangat besar. Selain itu, hal ini ditunjang dengan karakteristik sampah buah melon yang kaya karbohidrat, yang terdiri dari gula-gula sederhana yang mudah diuraikan dan kadar air yang mencapai 90,15% berat (USDA, 2017). Oleh karena itu, sampah buah melon sangat ideal dijadikan substrat untuk produksi energi alternatif secara fermentasi. Salah satu energi alternatif masa depan adalah biohidrogen. Pembakaran hidrogen hanya menghasilkan uap air dan dapat diproduksi dari berbagai jenis substrat organik terbarukan secara fermentasi gelap. Proses fermentasi gelap memiliki beberapa keuntungan antara lain tidak membutuhkan cahaya, proses yang lebih praktis dan aplikatif, biaya produksi yang rendah apalagi ketika substrat yang digunakan berasal dari sampah organik (Kim dkk., 2011) seperti sampah buah.

Pemanfaatan sampah buah melon sebagai substrat untuk produksi biohidrogen telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu. Cahyari dkk. (2013) pada penelitian secara *batch* tanpa kontrol pH dengan variasi konsentrasi 2–18 g VS/L melaporkan pada konsentrasi substrat di atas 6 g VS/L produksi hidrogen menurun karena penurunan pH sistem. Ameekan (2014) mempelajari pengaruh asal inokulum terhadap produksi biohidrogen secara *batch*. Ia melaporkan bahwa *yield* hidrogen tertinggi dihasilkan ketika menggunakan campuran inokulum dari *sludge* biodigester sampah buah dan *sludge* digester kotoran sapi. Penelitian yang mempelajari performa fermentasi secara kontinu menggunakan substrat buah-buahan maupun kulit buah telah lebih banyak dilakukan antara lain oleh Vijayaraghavan (2007), Feng dkk., (2010),

Akinboni dan Taherzadeh (2015), serta Nurkholis (2017).

Studi kinetika yang melibatkan substrat buah pernah dilakukan oleh Nathoa dkk. (2014) menggunakan substrat kulit pisang pada reaktor *batch* tanpa pengadukan. Penelitian ini hanya menggunakan pendekatan model persamaan Gompertz dan hanya untuk mengetahui parameter kinetika produk gas. Sedangkan kinetika pertumbuhan bakteri dari substrat buah melon pernah dipelajari oleh Nurkholis (2017). Pada penelitian tersebut digunakan reaktor pipa tanpa adanya kontrol pH dengan campuran inokulum *sludge* biodigester kotoran sapi, ampas tahu, dan sampah buah. Perilaku dan laju produksi biohidrogen akan berbeda bergantung pada karakteristik substrat, jenis reaktor, dan kondisi operasi. Sementara itu kinerja produksi biohidrogen dari sampah buah melon dalam reaktor tangki berpengaduk dengan melakukan kontrol pH pada pH 5,5 serta studi kinetika pembentukan produk dan pertumbuhan sel bakteri yang menyertainya belum pernah dilaporkan sebelumnya. Parameter kinerja reaktor pada penelitian ini dilihat dari jumlah substrat yang mampu diuraikan, laju produksi gas dan kadar hidrogen yang dihasilkan. Kinetika produksi hidrogen didekati dengan persamaan Gompertz, sedangkan kinetika pertumbuhan bakteri didekati dengan persamaan logistik.

2. Metode Penelitian

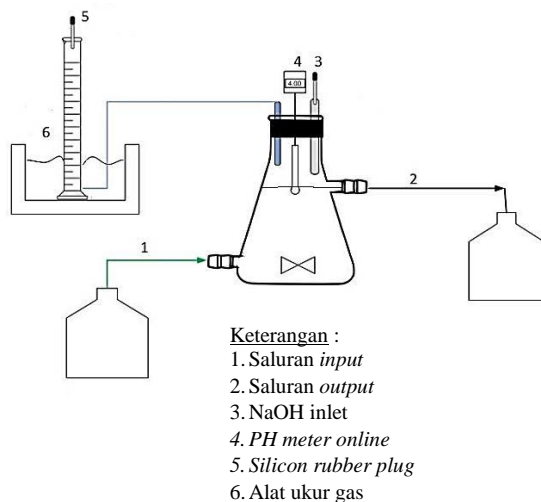
2.1 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampah buah melon yang diperoleh dari Pasar Buah dan Sayur Gemah Ripah, Gamping, Kabupaten Sleman, Yogyakarta. Inokulum diperoleh dari campuran *sludge* biodigester sampah buah di Pasar Buah dan Sayur ‘Gemah Ripah’, Gamping, Kabupaten Sleman, Yogyakarta. *Sludge* biodigester kotoran sapi diperoleh dari Pusat Inovasi Agroteknologi (PIAT) UGM, Berbah, Kabupaten Sleman, Yogyakarta, aquadest, HCl 37% p.a. (Merck), NaOH p.a. (Merck), pepton (Merck), *yeast extract* (Merck), glukosa (Merck), KH₂PO₄ (Merck), Na₂HPO₄ p.a. (Merck), MgSO₄.7H₂O

p.a. (Merck), NaHCO_3 p.a. (Merck), resazurin (Sigma Aldrich), L-Cystein-HCl (Merck), gas N_2 dan alkohol 96%, HgSO_4 (Merck), dan Ag_2SO_4 (Merck).

2.2 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 1. Reaktor tangki berpengaduk berupa erlenmeyer berukuran 3 liter yang telah dimodifikasi dan dilengkapi dengan pH meter dan pengukur gas (*water displacement method*).



Gambar 1. Rangkaian alat penelitian

2.3 Cara Penelitian

2.3.1 Persiapan Inokulum

Pada inokulum dari *sludge* biodigester biogas sampah buah dan kotoran sapi dilakukan *pretreatment* dengan pengasaman hingga pH 3 selama 24 jam menggunakan HCl 2N. Perlakuan ini bertujuan supaya bakteri metanogen menjadi tidak aktif dan bakteri penghasil hidrogen membentuk spora (Ruggeri dkk., 2013). Selanjutnya dilakukan aktivasi dan pengayaan dengan memindahkan inokulum ke dalam medium Pepton-yeast-glucose (PYG) dengan komposisi 10 g/L pepton, 10 g/L yeast extract, 10 g/L glukosa selama 3 kali siklus 24 jam.

2.3.2 Persiapan Substrat

Sampah buah melon dihaluskan dengan menggunakan *blender* dan disimpan di dalam kulkas dengan suhu di bawah $4\text{ }^\circ\text{C}$ hingga siap untuk digunakan untuk mencegah terjadinya pembusukan lebih lanjut. Kulit dan biji melon

tidak digunakan dalam penelitian ini. Kulit melon mengandung senyawa antimikroba eugenol (Aubert dan Pitrat, 2006) yang dapat menghambat proses fermentasi sedangkan biji melon sangat keras dan mengandung minyak (Fasogbon, 2015) yang sulit untuk diuraikan.

2.3.3 Produksi biohidrogen

Campuran yang terdiri dari 30% substrat sampah melon, 10% inokulum mikroba campuran, dan 60% medium produksi (pepton 5 g/L; yeast extract 0.5 g/L; KH_2PO_4 1.2 g/L; Na_2HPO_4 5.1 g/L; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g/L; NaHCO_3 3 g/L; Resazurin 1 mg/L; L-cystein HCl 0.5 mg/L) dimasukkan ke dalam reaktor tangki berpengaduk lalu di-*flushing* dengan gas nitrogen untuk mendapatkan kondisi anaerob. Reaktor beroperasi pada suhu ruang dan tekanan atmosferik. pH awal adalah 6,85 dengan konsentrasi awal substrat 13.100 mg-sCOD/L. Nilai pH operasi dijaga agar tidak turun di bawah 5,5 dengan penambahan NaOH 5N ketika pH mulai drop. Pengamatan dilakukan selama 24 jam dan dilakukan pengambilan sampel gas dan cairan setiap jam.

2.3.4 Model Kinetika

Pendekatan matematis dilakukan dengan mengasumsikan kultur bakteri sebagai *pseudomonoculture*, *pseudosingle substrate* dan laju produksi biogas disumsikan sebanding dengan laju pertumbuhan bakteri (*associated growth product formation*) sehingga *yield* produk merupakan fungsi dari pertumbuhan bakteri.

2.3.4.1 Kinetika Pembentukan Hidrogen

Kinetika produksi hidrogen mengikuti model persamaan modifikasi Gompertz (Gadhamshetty dkk., 2010). Persamaan ini digunakan ketika bakteri mengalami fase *lag* atau waktu penyesuaian pada kondisi reaktor sebelum akhirnya memproduksi hidrogen. Pada penelitian ini diduga akan terdapat fase *lag* (fase penyesuaian) pada awal waktu *start-up* karena ada perbedaan komposisi antara medium *enrichment* dan kondisi di dalam reaktor. Persamaan modifikasi Gompertz dinyatakan pada Persamaan 1.

$$Y = A \exp \left(-\exp \left[\frac{\mu_m e}{A} (\lambda - t) + 1 \right] \right) \quad (1)$$

dimana:

Y = produksi hidrogen kumulatif per satuan waktu ($\text{mLH}_2/\text{L}_{\text{reaktor}}$),

A = potensi hidrogen maksimum ($\text{mLH}_2/\text{L}_{\text{reaktor}}$),

λ = fase lag (jam),

μ_m = laju pembentukan produk maksimum ($\text{mLH}_2/\text{L}_{\text{reaktor}}/\text{jam}$), dan

e = bilangan Euler (2,71828)

2.3.4.2 Kinetika Pertumbuhan Sel Bakteri

Kinetika pertumbuhan sel didekati dengan persamaan logistik (Mullai dkk., 2014). Persamaan ini diturunkan dengan menganggap laju pertumbuhan bakteri berhubungan dengan jumlah *carrying capacity* yang tidak digunakan. Pertumbuhan bakteri akan dibatasi oleh produk samping yang bersifat racun bagi perumbuhan bakteri. Persamaan logistik dapat dinyatakan sebagai Persamaan 2:

$$\mu_g = Kc \cdot \left(1 - \frac{X}{X_{max}} \right) \quad (2)$$

dimana:

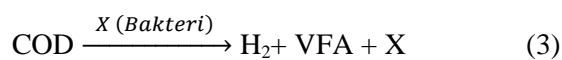
μ_g = laju pertumbuhan spesifik (hari^{-1})

Kc = konstanta *carrying capacity* (hari^{-1})

X = konsentrasi sel (mg/L)

X_{max} = konsentrasi sel maksimum (mg/L)

Reaksi pembentukan biohidrogen secara umum dapat dinyatakan seperti pada Persamaan 3:



Neraca massa yang digunakan untuk mendapatkan konstanta kinetika persamaan logistik adalah Persamaan 4-6:

$$-\frac{d\text{COD}}{dt} = \frac{1}{Y'_{X/\text{COD}}} \cdot \mu_g X \quad (4)$$

$$\frac{d\text{VFA}}{dt} = Y_{\text{VFA}/x} \cdot \mu_g \cdot X \quad (5)$$

$$\frac{d\text{H}_2}{dt} = Y_{\text{H}_2/x} \cdot \mu_g \cdot X \quad (6)$$

2.3.5 Metode Analisis

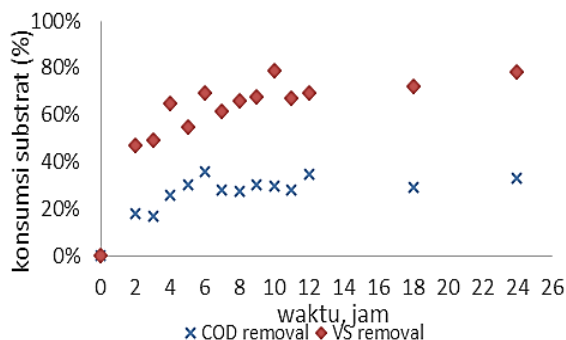
Volume gas total diukur dengan *water displacement method* dan dihitung pada keadaan

STP sedangkan kadar hidrogen dianalisis dengan *gas chromatography* (GC) Shimadzu GC 8A yang dilengkapi dengan *thermal conductivity detector* (TDC) dan *dual packed column*. Konsentrasi *volatile solid* (VS) diukur dengan dengan metode gravimetri. *Soluble chemical oxygen demand* (sCOD) diukur melalui metode kolorimetri menggunakan potasium dikromat sebagai oksidator. *Volatile fatty acid* (VFA) sebagai asam asetat, butirat, dan propionat dianalisis menggunakan *gas chromatography* (GC) yang dilengkapi detektor *flame ionization*. Analisis jumlah bakteri dilakukan dengan *Petroff Hauser* dan diamati dengan mikroskop *pentaview* dengan perbesaran objektif 40 kali dan okuler 40 kali. Sedangkan analisis data untuk menentukan parameter kinetika dilakukan dengan simulasi menggunakan program Matlab.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Konsumsi substrat

Profil penurunan VS dan sCOD selama 24 jam dapat dilihat pada Gambar 2. Nilai sCOD *removal* tertinggi diperoleh pada jam ke-6 sebesar 35,86% namun secara kumulatif pada akhir fermentasi hanya mencapai 24,61%. Sementara itu VS *removal* tertinggi 79,09% diperoleh pada jam ke-10 tetapi pada akhir fermentasi VS *removal* menurun menjadi 78,28%. Konsentrasi zat organik yang fluktuatif disebabkan karena zat organik yang terhitung bukan hanya konsentrasi substrat melon saja. Biomassa bakteri juga terhitung sebagai konsentrasi zat organik. Selama proses degradasi anaerobik terjadi, sel-sel bakteri yang tumbuh dan berkembang akan terhitung sebagai penambahan konsentrasi VS di dalam reaktor.

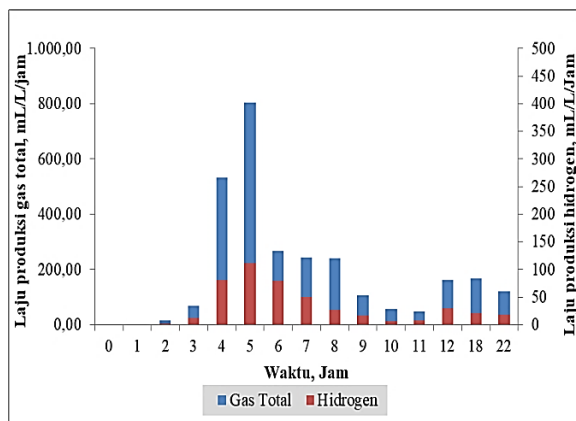


Gambar 2. Profil VS removal dan sCOD removal fase batch

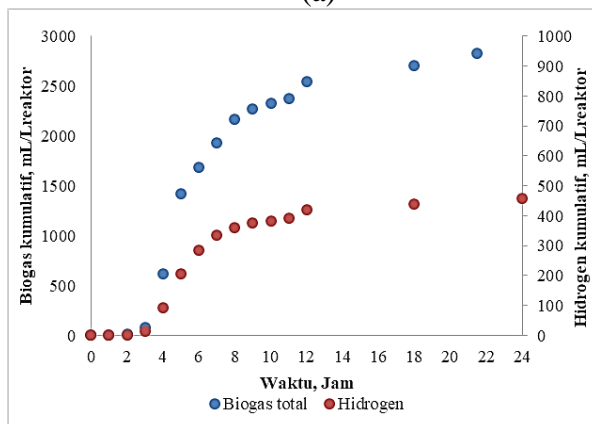
Di sisi lain sel-sel bakteri tersebut ada pula yang mengalami kematian. Hal ini diduga menjadi salah satu penyebab adanya fluktuasi konsentrasi *volatile solid*. Sementara itu pada perhitungan sCOD, produk metabolit VFA yang tidak teridentifikasi juga dihitung sebagai sCOD yang mengakibatkan terganggunya akurasi pengukuran sCOD.

3.2 Produksi Biogas dan Kadar Hidrogen

Gambar 3 menunjukkan bahwa produksi gas mulai terlihat setelah jam ke-2 namun volume yang dihasilkan masih sangat kecil. Produksi gas mulai signifikan setelah jam ke-3 dan laju produksi tertinggi dicapai pada jam ke-5 dan selanjutnya menurun hingga jam ke-24. Kadar hidrogen yang dihasilkan berkisar antara 0,72% - 29,65%. Laju produksi biogas total tertinggi diperoleh pada jam kelima sebesar 803,91 mL_{biogas}/L_{reaktor}/jam dan laju produksi hidrogen 81,21 mL H₂/L_{reaktor}/jam.



(a)



(b)

Gambar 3. Profil laju produksi gas per waktu (a) dan produksi hidrogen kumulatif (b)

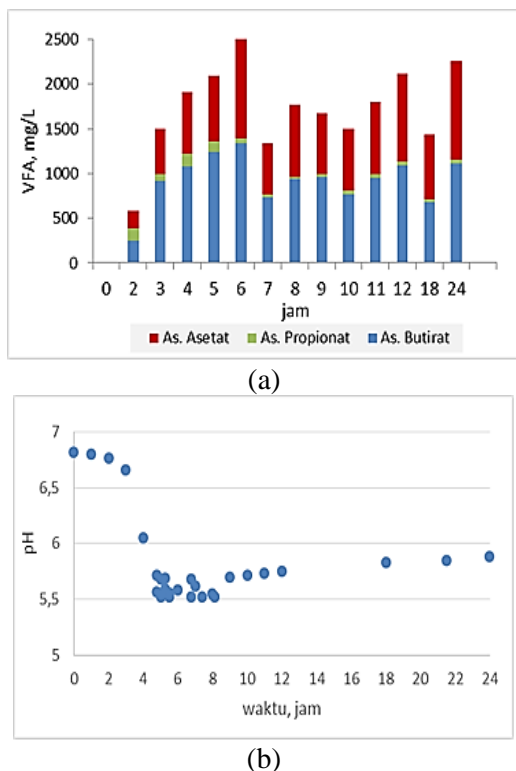
Secara kumulatif penambahan biogas total dan produksi hidrogen semakin melambat setelah melewati jam ke-8. Kadar hidrogen selama 24 jam diperoleh sebesar 16,20% yaitu 458,12 mLH₂/L_{reaktor}. Kadar hidrogen tersebut relatif kecil dibandingkan dengan penelitian lain dengan menggunakan kultur mikroba campuran pada kondisi mesofilik dan pH operasi 5,5. Fang dan Liu (2002) melaporkan kadar hidrogen sebesar 64% dengan menggunakan substrat glukosa. Sementara itu Khanal dkk (2004) melaporkan kadar hidrogen sebesar 40% untuk substrat sukrosa dan kadar hidrogen sebesar 25% untuk substrat pati.

3.3 Produksi Volatile Fatty Acid (VFA) dan Profil pH

Volatile Fatty Acid (VFA) merupakan produk metabolit utama dari proses fermentasi gelap secara anaerob. Pembentukan VFA berkorelasi dengan perubahan pH di dalam reaktor. Semakin tinggi konsentrasi VFA maka pH di dalam reaktor akan semakin rendah. Pada Gambar 4 terlihat bahwa produksi VFA terus meningkat mulai dari tahap awal fermentasi sampai pada jam ke-6. Hal ini bersesuaian dengan profil produksi gas hidrogen yang juga mengalami kenaikan secara eksponensial mulai dari jam ke-2 sampai dengan jam ke-5. pH di dalam reaktor pun terus-menerus mengalami penurunan hingga mencapai pH 5,5 pada jam ke-5. Selanjutnya profil VFA cenderung fluktuatif karena adanya penetralan dengan NaOH.

Produk VFA yang paling dominan dihasilkan adalah asetat dan butirat. Sedangkan asam propionat yang merupakan hasil dari aktivitas bakteri pengonsumsi hidrogen ditemukan dalam jumlah yang sangat sedikit. Hal ini menunjukkan bahwa proses *pretreatment* mampu menekan aktivitas bakteri pengonsumsi hidrogen. Rata-rata rasio konsentrasi asam butirat dan asam asetat (B/A) setiap jam hanya berkisar 7:6. Rasio ini lebih kecil jika dibandingkan dengan penelitian lain. Ghimire dkk. (2015) melaporkan bahwa fermentasi gelap dengan menggunakan kultur campuran dapat mencapai rasio B/A sebesar 3:2. Semakin besar ratio B/A maka produksi hidrogen akan semakin

meningkat. Rendahnya rasio B/A menjadi alasan rendahnya produksi hidrogen pada penelitian ini. Selain itu rendahnya kadar hidrogen diduga disebabkan karena sejak awal penyiapan inokulum, kemungkinan komunitas bakteri telah didominasi oleh bakteri penghasil hidrogen yang bersifat anaerob fakultatif. Bakteri anaerob fakultatif menghasilkan *yield* yang lebih rendah daripada bakteri anaerob obligat (Balachandar dkk 2013).



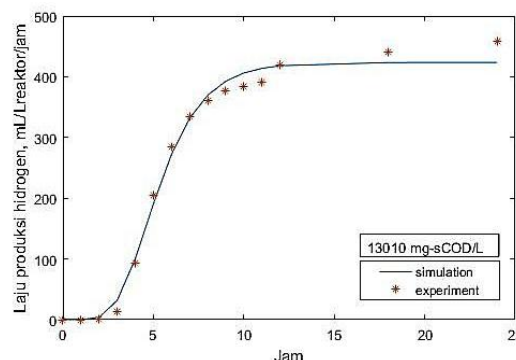
Gambar 4. Produksi VFA (a), profil perubahan pH (b)

Profil perubahan pH menunjukkan adanya 3 fase perubahan pH. Sampai dengan jam ke-5 terjadi penurunan pH secara alamiah di dalam reaktor. Jam ke-5 sampai dengan jam ke-8 terjadi fluktuasi pH karena pengontrolan dengan penambahan NaOH. Di atas jam ke-8 sampai dengan jam ke-24 perlahan-lahan mulai terjadi kenaikan pH. Kenaikan pH di atas jam ke-8 disebabkan karena pada saat ini mulai terjadi degradasi protein membentuk nitrogen amoniak. Kehadiran amoniak tersebut mampu meningkatkan kapasitas *buffer* didalam reaktor yang mencegah terjadinya penurunan pH (Kim dkk., 2011). Fang dan Liu (2002) melaporkan pH terbaik untuk produksi hidrogen adalah 5,5. pH operasi yang tidak stabil pada pH 5,5 ini diduga

juga menjadi salah satu alasan rendahnya kadar hidrogen pada penelitian ini. Pengontrolan pH operasi hanya fokus kepada tujuan agar pH operasi tidak turun di bawah 5,5, sedangkan pH operasi sebenarnya pada penelitian ini berada pada kisaran 5,5-6.

3.4 Kinetika Pembentukan Gas Hidrogen

Kurva simulasi dari persamaan Gompertz ditunjukkan pada Gambar 5 dan parameter kinetika yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 1. Potensi hidrogen maksimum yang dapat dihasilkan sebesar 423,56 mLH₂/L_{reaktor}, laju pembentukan hidrogen maksimum diperoleh sebesar 91,78 mLH₂/L_{reaktor}/jam dan fase *lag* selama 2,9 jam. Dibandingkan dengan penelitian sejenis pada Tabel 1 yang juga menggunakan inokulum campuran dengan kondisi operasi yang mirip, nilai A dan μ_m pada penelitian ini lebih rendah disebabkan oleh konsentrasi awal substrat yang digunakan memang lebih kecil sehingga hidrogen kumulatif yang dihasilkan juga lebih sedikit.



Gambar 5. Kurva simulasi model kinetika persamaan Gompertz

Akan tetapi fase *lag* yang dibutuhkan pada penelitian ini jauh lebih singkat dibandingkan dengan penelitian lain. Kim dkk (2011) menyatakan bahwa fase *lag* lebih dipengaruhi oleh pH awal fermentasi. Pada penelitiannya dilaporkan fase *lag* sebesar 4,2 jam dengan pH awal yang sama dengan penelitian ini, yaitu pH 7. Hal ini disebabkan karena inokulum pada penelitian ini sudah mengalami proses pengayaan dalam medium PYG sebelum digunakan untuk proses produksi sehingga dapat mempersingkat waktu *lag*. Pengayaan pada medium Pepton-

Yeast-Glukosa (PYG) pada pH netral dan diinkubasi pada suhu 37 °C membuat endospora beradaptasi dengan cepat dan kembali ke fase vegetatifnya. Pada masa pengayaan ini bakteri tumbuh dengan memanfaatkan substrat ideal glukosa sebagai sumber energi sehingga jumlah bakteri penghasil hidrogen akan berkembang pesat. Pengayaan ini mempercepat proses *start-up* di dalam reaktor apabila dibandingkan dengan langsung menggunakan bakteri yang masih dalam bentuk endospora.

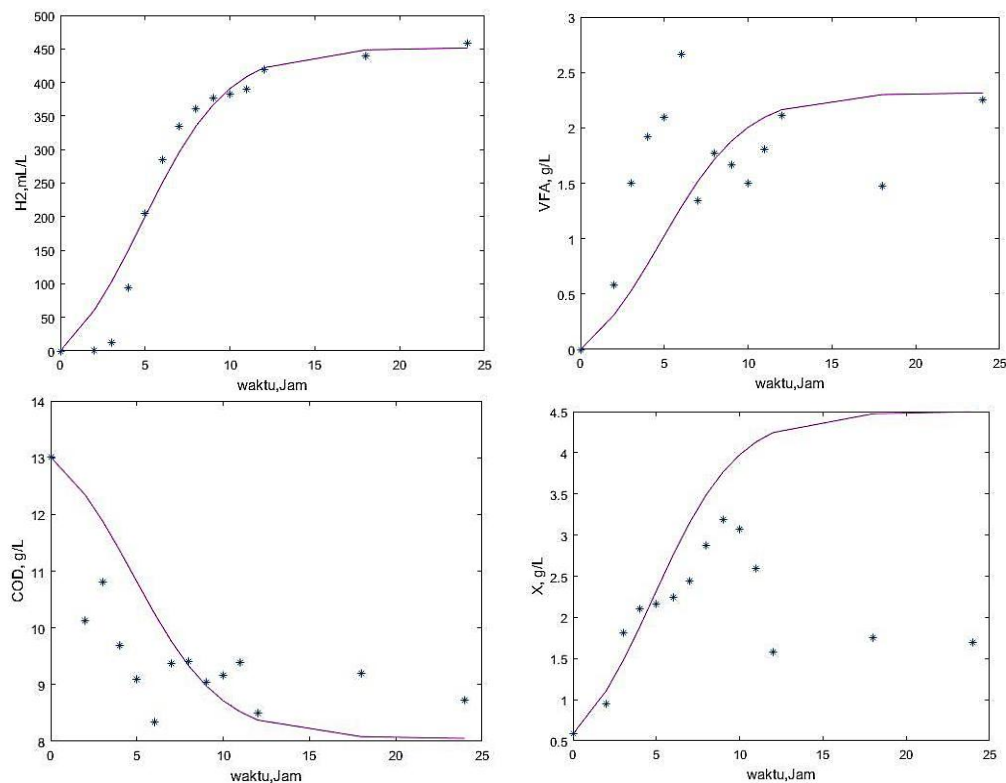
Tabel 1. Parameter kinetika persamaan Gompertz

Konsentrasi awal	A (mLH ₂ / L _{reaktor})	μ_m (mLH ₂ / L _{reaktor} / jam)	λ (jam)	Peneliti
13.100 mg/L	423,56	91,78	2,9	Sarlinda
30.000 mg/L, pH awal 7 pH akhir 5	-	161	4,2	Kim dkk. (2011)
30.000 mg/L pH 5,5	-	201	9,5	Mu dkk (2006)

3.5 Kinetika Pertumbuhan Bakteri

Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 6 dan parameter kinetika ditampilkan pada Tabel 2.

Hasil simulasi menunjukkan data hasil eksperimen dapat dimodelkan dengan cukup baik dengan persamaan logistik. Penyimpangan terjadi pada kurva VFA, sCOD, dan biomassa bakteri (X). Pada kurva VFA hasil simulasi, nilai VFA memiliki kecenderungan meningkat dan mulai *steady* sejak jam ke-11, sedangkan kurva hasil eksperimen menunjukkan tren menurun sejak jam ke-7 dan cenderung fluktuatif pada jam-jam selanjutnya. Fluktuasi pada data eksperimen disebabkan oleh adanya reaksi netralisasi akibat penambahan NaOH sebagai upaya mempertahankan pH operasi agar tidak turun melebihi pH 5,5. Penurunan konsentrasi sCOD hasil eksperimen juga cenderung fluktuatif disebabkan karena hasil samping berupa VFA ikut terhitung sebagai sCOD. Nilai sCOD eksperimen hanya dikurangi dengan VFA sebagai asetat, butirat, dan propionat, sedangkan VFA lain yang tidak diukur konsentrasinya masih terhitung sebagai COD. Sehingga nilai COD sebenarnya tanpa VFA akan lebih rendah daripada perhitungan sCOD hasil eksperimen.



Gambar 6. Kurva simulasi model kinetika dengan model pertumbuhan bakteri persamaan logistik

Penyimpangan yang cukup besar terjadi pada kurva biomassa bakteri (X). Jumlah konsentrasi biomassa bakteri masih terus meningkat hingga jam ke-18. Sementara itu data hasil eksperimen menunjukkan tren menurun sejak jam ke-10. Hal ini disebabkan karena penghitungan bakteri secara akurat menggunakan Petroff Hausser setelah jam ke-9 menjadi semakin sulit karena semakin banyak bakteri yang membentuk koloni. Hasil simulasi menunjukkan bahwa untuk mendapatkan produk hidrogen dengan hasil samping VFA dan konsumsi COD sebagaimana data eksperimen, maka jumlah bakteri yang berkembang di dalam rektor seharusnya jauh lebih tinggi daripada data eksperimen.

Tabel 2. Parameter kinetika persamaan logistik

Parameter	Nilai
K_c (jam ⁻¹)	0,393
X_{max} (g/L)	4,5
$Y_{H_2/X}$ (mL H ₂ /g sel)	115,19
$Y_{VFA/X}$ (g VFA/g sel)	0,59
$Y_{X/COD}$ (g sel/g COD)	0,79
K_d (jam ⁻¹)	0,0001

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Gas hidrogen yang dihasilkan sebesar 458,12 mLH₂/L_{reaktor} yaitu 16,20% dari total biogas yang diproduksi dengan konsumsi VS sebesar 78,28 % dan konsumsi sCOD sebesar 24,61%.
2. Produk metabolit utama yang dihasilkan adalah asetat, butirat dan propionat, dengan rasio (B/A) sebesar 1,2.
3. Kinetika produksi hidrogen dapat didekati dengan persamaan Gompertz dengan parameter kinetika $A= 423,5577$ mLH₂/L_{reaktor}, $\mu_m= 91,7810$ mLH₂/L_{reaktor}/jam dan $\lambda= 2,9$ jam.
4. Kinetika pertumbuhan bakteri dapat didekati dengan persamaan logistik dengan nilai parameter kinetika $K_c= 0,3932$ jam⁻¹, $X_{max} = 4,5$ g/L, $Y_{H_2/X} = 115,19$ ml H₂/g sel, $Y_{VFA/X} = 0,59$ g VFA/g sel, $Y_{X/COD} = 0,79$ g sel/g COD, dan $k_d = 0,0001$ jam⁻¹.

Daftar Notasi

- Y = produksi hidrogen kumulatif per satuan waktu (mL H₂/L_{reaktor})
 A = potensi hidrogen maksimum yang dapat dihasilkan (mL H₂/L_{reaktor})
 μ_m = laju pembentukan hidrogen maksimum (mL H₂/L_{reaktor}/jam)
 λ = fase lag yang dibutuhkan sebelum terbentuk hidrogen (jam)
 μ_g = laju pertumbuhan spesifik (jam⁻¹)
 K_c = konstanta carrying capacity (jam⁻¹)
 X = konsentrasi sel (mg/L)
 K_d = konstanta kematian (jam⁻¹)
 $Y_{H_2/X}$ = yield hidrogen terhadap jumlah sel bakteri terbentuk (ml H₂/g sel)
 $Y_{VFA/X}$ = yield VFA terhadap jumlah sel bakteri terbentuk (g VFA/g sel)
 $Y_{X/COD}$ = yield sel terhadap konsentrasi COD yang dikonsumsi (g sel/g COD)
 X_{max} = konsentrasi sel bakteri maksimum (g/L)

Daftar Pustaka

- Akinboni, J., and Taherzadeh, M. J., 2015, Evaluation of fermentative hydrogen production from single and mixed fruit wastes, *Energies*, 8(5), 4253-4272
- Ameekan, Y., 2014, Pengaruh Perbedaan asal inokulum terhadap produksi hidrogen dari limbah buah melon (*Cucumis melo. L*) pada fermentor batch, Skripsi, Universitas Gadjah mada.
- Anonim, 2017, Basic Report : Nutrient data for 09181, Melons, cantaloupe, raw, Available at: <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/2274> (Accessed at 21 juli 2017)
- Aubert, C., and Pitrat, M., 2006, Volatile compounds in the skin and pulp of Queen Anne's pocket melon, *J. Agric. Food Chem.*, 54(21), 8177–8182.
- Balachandar, G., Khanna, N., and Das, D., 2013, Biohydrogen Production from Organic Wastes by Dark Fermentation, in *Biohydrogen*, Elsevier B.V., 1st edition, 103-144 (online book)
- Cahyari K., Hidayat M., Sarto, Syamsiah S., 2013, Effect of initial substrate concentration on biohydrogen production from orange and

- melon fruit waste through dark fermentation, the 6th Regional Conf. on Chemical Eng., pp 24,
- Fang, H.H.P., and Liu, H., 2002, Effect of pH on hydrogen production from glucose by a mixed culture, *Bioresour. Technol.*, 82, 87–93.
- Fasogbon, S.K., 2015, Melon oil methyl ester : An environmentatly friendly fuel, *Journal of Natural Resources and Development*, 5, 7-53.
- Feng X., Wang H., Wang Y., Wang X., and Huang J., 2010, Biohydrogen production from apple pomace by anaerobic fermentation with river sludge', *Int. J. Hydrogen Energy*, 35(7), 3058–3064.
- Gadhamshtetty V., Arudchelvam Y., Nirmalakhandan N., and Johnson D., 2010, Modeling dark fermentation for biohydrogen production: ADM1-based model vs. Gompertz model, *Int. J. Hydrogen Energy*, 479-490.
- Ghimire A., Frunzo L., Pirozzi F., Escudie R., Lens P.N.L., and Esposito G., 2015, A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: Process parameters and use of by-products, *Appl. Energy*, 144, 73–95.
- Khanal, S.K., Chen, W.H., Li L., and Sung S., 2004, Biological hydrogen production : Effect of pH and intermediate product, *Int. J. Hydrogen Energy*, 29(11), 1123-1131.
- Kim D.H., Kim S.H., Jung K.W., Kim M.S., and Shin H.S., Effect of initial pH independent of operational pH on hydrogen fermentation of food waste, *Bioresour. Technol.*, 102(18), pp. 8646–8652.
- Mu Y., Wang G., and Yu H.Q., 2006, kinetic modelling of batch hydrogen production process by mixed anaerobic cultures, *Bioresour. Technol.*, 97 (11), 1302-1307
- Mullai P., and Sridevi K., 2014, Cell growth and product formation kinetic of biohydrogen production using mixed concortia by batch process, *Int. J. of Chem. Tech. Research*, 6 (12), 5125-5130
- Nurkholis, 2017, Pengaruh organic loading rate (OLR) dan frekuensi pengumpanan pada produksi biohidrogen dari sampah buah melon (*Cucumis melo l.*) dengan pengumpanansecara berkala (*periodic feeding*) menggunakan reaktor alir pipa, Tesis, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- Nathoa C., Sirisukpoca U., and Pisutpaisal N., 2014, Production of hydrogen and methane from banana peel by two phase anaerobic fermentation, *Energy Procedia*, 50, 702–710.
- Ruggeri B., Tommasi T., and Sanfilippo S., 2013, Biohydrogen & Biomethane Through Anaerobic Digestion, *Green Energy and Technology*, 25-36.
- Vijayaraghavan K., Ahmad D., and Soning C., 2007, Bio-hydrogen generation from mixed fruit peel waste using anaerobic contact filter Bio-hydrogen generation from mixed fruit peel waste using anaerobic contact filter, *Int. J. Hydrogen Energy*, 32(18), 4754-4760.