

PENGEMBANGAN ENERGI ALTERNATIF BIOHIDROGEN BERBASIS BIOMASSA LIMBAH KAKAO DAN KOPI

ALTERNATIVE ENERGY DEVELOPMENT OF BIOHYDROGEN BASED ON COCOA AND COFFEE BIOMASS WASTE

Nendyo Adhi Wibowo dan Bambang Eka Tjahjana

Balai Penelitian Tanaman Industri dan Penyegar
JL. Raya Pakuwon- Parungkuda km. 2 Sukabumi, 43357
Telp.(0266) 7070941, Faks. (0266)6542087
nindya_bios@yahoo.com

ABSTRAK

Seiring dengan pencarian sumber bahan alternatif untuk memproduksi hidrogen, maka saat ini dikembangkan produksi hidrogen dari biomassa yang salah satunya bersumber dari limbah-limbah perkebunan khususnya limbah kakao dan kopi. Keunggulan dari biohidrogen ini adalah dapat dihasilkan dari bahan yang dapat diperbaharui, ramah lingkungan, hasil pembakaran berupa uap air yang tidak menyebabkan efek rumah kaca, hujan asam dan merusak lapisan ozon. Selain itu proses produksi dapat berlangsung pada tekanan dan suhu ruang, biaya produksi lebih rendah dan dapat memanfaatkan limbah hasil perkebunan yang digunakan sebagai substrat. Salah satu upaya mencari bahan baku yang lebih murah dalam produksi biohidrogen adalah menggunakan limbah perkebunan yang dapat dikonversi menjadi glukosa. Limbah kakao mengandung 14,58% selulosa, 4,32% lignin, dan 10,35% kadar air. Sedangkan kulit gelondong kopi kering terdiri atas 12,4% gula reduksi, 2,02% gula non pereduksi, dan lendir kering kopi mengandung 30% gula pereduksi, 17% selulosa. Limbah kakao dapat dihidrolisis secara kimiawi maupun biologi untuk menghasilkan gula reduksi seperti glukosa dan xylosa. Glukosa dan xylosa yang diperoleh dari proses hidrolisis dapat difermentasi lebih lanjut untuk menghasilkan hidrogen. Produksi hidrogen melalui proses non-fotosintetik memiliki beberapa keuntungan antara lain tidak memerlukan cahaya matahari sehingga bisa berlangsung sepanjang hari.

Kata kunci : Biohidrogen, Limbah Kakao, Limbah kopi, Bakteri non fotosintetik

ABSTRACT

Inline with finding alternative sources of materials to produce hydrogen, it is now developed the production of hydrogen from biomass. One of which is sourced from plantation wastes especially cocoa and coffee waste. The advantages of biohidrogen are it can be produced from renewable materials, environmentally friendly, it does not cause the greenhouse effect, acid rain and damage the ozone layer. In addition, the production process can take place at room temperature and pressure, lower production costs and can use waste crop that is used as the substrate. One effort to find cheaper raw materials in the production biohidrogen is using plantation waste that can be converted into glucose. Cocoa waste contain about 14.58% cellulose, 4.32% lignin, and 10.35% water content. While the dry skin of coffee logs consist of 12.4% reducing sugar, 2.02% non-reducing sugar; and dried mucus of coffee contain 30% reducing sugars and 17% cellulose. Cocoa waste can be hydrolyzed by chemical or biological process to produce reducing sugars such as glucose and xylose. Glucose and xylose obtained from the hydrolysis process can be further fermented to produce hydrogen. Hydrogen production through non-photosynthetic process has several advantages, among others, does not require sunlight so that it can be produced all day.

Keywords: biohidrogen, cocoa and coffee waste, non-photosynthetic bacteria

PENDAHULUAN

Penemuan baru di bidang energi alternatif dari biomassa semakin berkembang. Salah satu energi alternatif yang berpotensi untuk dikembangkan adalah biohidrogen. Gas hidrogen merupakan bahan bakar alternatif yang cukup menjanjikan untuk dikembangkan sebagai pengganti bahan bakar fosil, karena hidrogen dapat diproduksi dari bahan yang

dapat diperbaharui (bio-H₂), efisien dan tidak memiliki ikatan dengan karbon sehingga tidak akan menghasilkan emisi gas buang yang dapat mencemari lingkungan. Metode yang digunakan untuk memproduksi biohidrogen salah satunya berpotensi menggunakan biomassa limbah perkebunan kopi dan kakao yang dapat digunakan sebagai bahan baku fuel cell untuk pembangkit listrik. Salah satu metode produksi H₂ yang ramah lingkungan yaitu

dengan memanfaatkan proses bioteknologi atau memanfaatkan aktivitas mikroorganisme melalui proses fotosintesis atau fermentasi. Selain ramah lingkungan, proses ini dapat menghasilkan biohidrogen dengan kemurnian dapat mencapai lebih dari 99%.

Hasil pembakaran hidrogen yang menghasilkan air tidak menimbulkan bahan pencemar lingkungan seperti CO₂ yang dapat meningkatkan pemanasan global. Kajian mengenai produksi hidrogen dengan berbagai metode telah dilakukan dan dikembangkan., diantaranya hidrogen dapat dibuat dari air, biomassa dan bahan bakar fosil. Metode produksi hidrogen dari air meliputi proses elektrolisis (Zhang *et al*, 2009), auto elektrolisis, disosiasi thermal dengan katalis, alkalin (Wang & Wan, 2009) dan biofotolisis dengan mikroalga (Kirtay, 2011). Selain itu produksi hidrogen dapat dilakukan menggunakan bahan bakar fosil. Metode yang dipakai meliputi proses oksidasi parsial minyak berat dengan katalis, oksidasi parsial naptha, metana, metanol, steam reforming metanol dan gasifikasi batubara. Sebagian besar penyediaan hidrogen saat ini di produksi dari bahan bakar fosil dan pencairan udara.

Seiring dengan pencarian sumber bahan alternatif untuk memproduksi hidrogen, maka saat ini dikembangkan produksi hidrogen dari biomassa yang salah satunya bersumber pada limbah perkebunan khususnya limbah kulit kakao dan kopi. Metode produksi hidrogen dari biomassa dapat menggunakan metode secara kimia maupun secara biologi. Biomassa merupakan bahan yang menyimpan energi sinar matahari dalam bentuk energi kimia di dalam tubuh tanaman (Kirtay, 2011). Biomassa dapat diubah menjadi hidrogen melalui proses pirolisis dan gasifikasi. Kelemahan dari metode ini adalah terbentuknya tar/limbah gas dan char/arang. Oleh karena itu perlu pengembangan untuk memproduksi hidrogen dengan metode yang ramah lingkungan. Biohidrogen merupakan hidrogen yang diproduksi secara biologi yang biasanya melibatkan mikroorganisme atau enzim. Banyak jenis dan spesies mikroorganisme yang memiliki kemampuan untuk memproduksi biohidrogen. Metode yang digunakan untuk

memproduksi biohidrogen ini antara lain bio-fotolisis langsung, bio-fotolisis tak langsung, foto-fermentasi dan fermentasi gelap/*dark-fermentation*. Metode fotolisis hanya dapat dilakukan pada siang hari ketika adanya sinar matahari, karena mikroorganisme fotosintetik menggunakan energi matahari sebagai sumber energi. Metode fotosintesis gelap dapat dilakukan pada siang maupun malam hari. Hal ini tergantung dari jenis mikroorganisme yang digunakan dalam fermentasi, tetapi sebagian besar bakteri yang dapat digunakan untuk memproduksi biohidrogen merupakan bakteri fotosintesis dan fermentasi (foto-fermentasi).

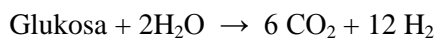
Keunggulan dari biohidrogen adalah dapat dihasilkan dari bahan yang dapat diperbaharui, ramah lingkungan, hasil pembakaran berupa uap air yang tidak menyebabkan efek rumah kaca, hujan asam dan merusak lapisan ozon. Selain itu proses produksi dapat berlangsung pada tekanan dan suhu ruang, biaya produksi lebih rendah dan dapat memanfaatkan limbah hasil perkebunan yang digunakan sebagai substrat.

A. Mikrobia Penghasil Gas Hidrogen

Mikroorganisme yang dapat menghasilkan biohidrogen adalah bakteri. Jenis bakteri yang biasa digunakan adalah bakteri anaerob, mikrobia fotosintetik dan bakteri *Cyanobacteria*. *Cyanobacteria* dapat menguraikan air menjadi hidrogen dan oksigen dengan bantuan cahaya matahari. Keuntungan mikrobia ini untuk memproduksi hidrogen adalah tidak menggunakan senyawa organik sebagai substrat tetapi menggunakan sinar matahari. Kelemahan dari proses ini adalah produksi hidrogen rendah dan lambat, sistem reaksinya membutuhkan energi yang besar dan pemisahan hirogen dan oksigen yang dihasilkan memerlukan penanganan yang khusus.

Bakteri anaerob tidak menggunakan air sebagai senyawa penghasil biohidrogen tetapi menggunakan senyawa organik. Keuntungan proses ini adalah produksi biohidrogen sangat cepat dan tidak memerlukan energi matahari. Kelemahan proses ini adalah hasil dekomposisi senyawa organik ini menghasilkan senyawa asam organik seperti asam asetat, asam butirat dan lain lain.

Bakteri yang dianggap cukup untuk memproduksi biohidrogen adalah bakteri fotosintetik. Bakteri jenis ini menggunakan senyawa organik sebagai substrat dan membutuhkan cahaya matahari. Keuntungan proses ini adalah penggunaan energi matahari yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan *Cyanobacteria*, hal ini disebabkan adanya senyawa organik sebagai substrat. Senyawa organik yang dapat digunakan sebagai substrat oleh bakteri ini adalah asam lemak, gula, tepung, selulosa dan lainnya. Bakteri fotosintetik dalam memproduksi hidrogen melibatkan senyawa organik, fotosistem, feridoksin, dan enzim nitrogenase. Reaksi produksi hidrogen dari substrat glukosa oleh bakteri fotosintetik adalah sebagai berikut :



Ada berbagai macam mikroorganisme yang dapat menghasilkan biohidrogen baik fotosintetik maupun yang non-fotosintetik. Bakteri yang termasuk fotosintetik antara lain *Rhodospseudomonas Rhodobacter*, *Anabaena*, *Chlamydomonas*, *Chromatium*, dan *Thiocapsa*. Sedangkan yang termasuk nonfotosintetik antar lain *Klebsiella*, *Clostridium*, *Enterobacter*, *Azotobacter*, *Metanobacteria*, dan *Eschericia coli*. Salah satu contoh bakteri fotosintetik adalah *Rhodospseudomonas marina/Rhodobium marinum*. Bakteri ini termasuk bakteri gram negatif, berbentuk batang, bergerak, fotoheterotrop anaerob fakultatif, dan memproduksi warna merah (Hirashi *et al.* 1995). *Rhodobium marinum* diisolasi dari laut pada tahun 1995. Enzim yang terlibat pada fotosintetik produksi H_2 oleh bakteri ini adalah enzim nitrogenase. Isolat Sanur merupakan konsorsium bakteri fotosintetik yang diisolasi dari air laut pantai Sanur, Bali. Bakteri dominan yang ada dalam isolat ini adalah *R. marinum* sehingga isolat tersebut berwarna merah .

Salah satu bakteri yang dikembangkan untuk memproduksi biohidrogen adalah : *Enterobacter aerogenes* . *E. aerogenes* termasuk dalam kelas *Enterobacteriaceae* yang dapat memfermentasi laktosa dengan produk akhir berupa asam-asam organik seperti asam asetat, asam laktat, asam butirat serta alkohol seperti 2,3-butandiol dan etanol. Sama halnya

dengan *Eschericia* dan *Klebsiella*. *Enterobacter aerogenes* merupakan bakteri gram negatif berbentuk batang dengan panjang sekitar 1,2 – 3,0 μm dan lebar 0,6 – 1,0 μm . Bakteri tersebut bersifat anaerob fakultatif dan kemoorganotrof dengan suhu pertumbuhan optimum 30-37°C. *E. aerogenes* menghasilkan koloni dengan tekstur *smooth* pada medium padat. Bakteri tersebut bersifat kosmopolit karena dapat dijumpai pada berbagai habitat seperti air, tanah, sampah dan produk makanan serta merupakan flora normal dalam usus manusia. *E. aerogenes* dapat hidup pada kisaran pH yang cukup luas. Yokoi *et al* (1997) mengisolasi *E. aerogenes aciduric* HO-39 yang dapat hidup pada pH 3,3 secara aerob dan pH 4 secara anaerob. Rachman *et al* (1997) mengisolasi *E. aerogenes* HU-101 dari lumpur fermentasi metana yang tumbuh optimum pada pH 7. *Enterobacter aerogenes* memiliki pola pertumbuhan yang cepat. Rachman *et al* (1997) melaporkan bahwa kultur *E. aerogenes* HU-101 yang ditumbuhkan pada kondisi anaerob fakultatif suhu 37°C dengan kandungan glukosa 2% dalam medium kompleks telah mencapai fase stasioner pada jam ke-24. Bakteri tersebut juga memiliki fase lag yang sangat pendek.

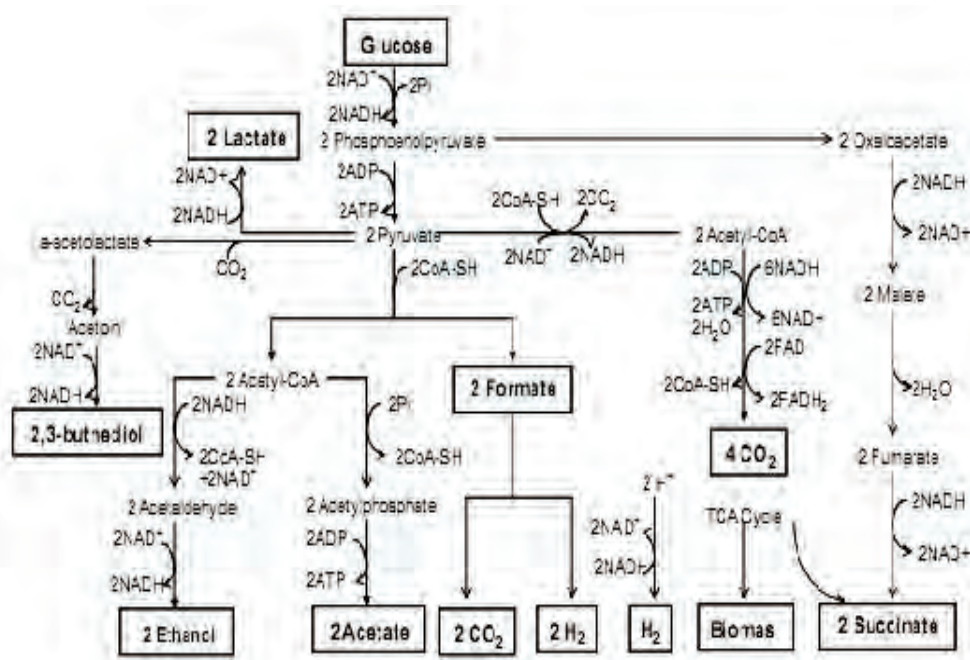
E. aerogenes VP-1 dan VP-2 yang merupakan hasil mutasi dengan N-methyl-N-nitro-N-nitrosoguanidine (NTG) memiliki pertumbuhan yang cepat pada kondisi anaerob fakultatif suhu 37 °C dengan kandungan glukosa 1 %. *E. aerogenes* VP-1 telah mencapai fase stasioner pada jam ke 5, sedangkan *E. aerogenes* VP-2 mencapai fase stasioner pada jam ke 6 (Ito *et al*, 2005).

Mutan *E. aerogenes* AY-2 yang ditumbuhkan pada kondisi anaerob fakultatif suhu 37°C dengan kandungan glukosa 2% dalam medium kompleks memiliki fase lag yang cukup lama yaitu 4 jam. Fase lag tersebut jauh lebih lama dibandingkan fase lag pada *wild type* yaitu kurang dari 2 jam. Pertumbuhan *E. aerogenes* A Y -2 pada jam ke 24 belum mengalami fase stasioner sedangkan *wild type* telah mengalami fase stasioner (Rachman *et al*, 1997).

Gas biohidrogen yang diproduksi oleh bakteri fotosintetik dihasilkan melalui proses foto-fermentasi (gambar 1). Fotosistem pada

bakteri fotosintetik hanya melibatkan satu fotosistem. Fotosistem terjadi dalam membrane intraseluler. Fotosistem pada bakteri ini tidak cukup kuat untuk memecah air. Pada kondisi anaerob, bakteri fotosintetik dapat dengan baik menggunakan asam organik sederhana seperti asam asetat sebagai donor elektron. Elektron yang dilepaskan dari senyawa organik akan dipompakan oleh sejumlah besar pembawa elektron (diantara kuinon dan plastosianin). Selama transport elektron, proton dipompakan melewati membrane (dalam kompleks protein sitokrom bc1) sehingga terjadi gradien proton. Gradien proton yang terjadi digunakan oleh enzim ATP sintase untuk menghasilkan ATP. Energi ATP yang terbentuk dapat digunakan

untuk transport lebih jauh elektron ke lektron aseptor feridoksin (Fd). Jika molekul nitrogen tidak ada, maka enzim nirogenase dapat mereduksi proton menjadi gas hidrogen dibantu dengan energi dalam bentuk ATP dan elektron yang diperoleh dari feridoksin (Fd). Secara keseluruhan foto-sistem bakteri fotosintetik ini mengubah komponen utama dari asam organik menjadi biohidrogen dan karbon dioksida. Fotosistem bakteri ini tidak menghasilkan oksigen sehingga tidak menghambat kerja enzim nitrogenase mengingat enzim nitrogenase sensitif terhadap oksigen.



Gambar 1. Pola metabolisme anaerob (Zhang et al. 2009)

B. Analisa Sistem Produksi Hidrogen berbasis Biomassa Limbah Kakao dan Kopi

Salah satu upaya mencari bahan baku yang lebih murah dalam produksi biohidrogen adalah menggunakan limbah perkebunan yang dapat dikonversi menjadi glukosa. Salah satu alternatif limbah perkebunan yang mengandung selulosa adalah Limbah kakao. Limbah kakao merupakan limbah yang mengandung 14,58% selulosa, 4,32% lignin, dan 10,35% kadar air (Syamsiro et al, 2012). Limbah kakao dapat dihidrolisis baik secara kimiawi maupun secara biologi untuk menghasilkan gula reduksi seperti

glukosa dan xylosa. Glukosa dan xylosa yang diperoleh dari proses hidrolisis dapat difermentasi lebih lanjut untuk menghasilkan hidrogen. Produksi hidrogen melalui proses non-fotosintetik memiliki beberapa keuntungan antara lain tidak memerlukan cahaya matahari sehingga bisa berlangsung sepanjang hari.

C. Potensi Biomassa Limbah Kakao

Pengembangan potensi biomassa sebagai salah satu sumber energi terbarukan telah menjadi Kebijakan Pengembangan Energi Terbarukan dan Konservasi Energi (Energi Hijau) Departemen Energi dan Sumber Daya

Mineral. Biomassa dapat dikonversi menjadi energi dalam bentuk bahan bakar cair, gas, panas, dan listrik. Teknologi konversi biomassa menjadi bahan bakar padat, cair dan gas, antara lain teknologi pirolisis, esterifikasi, teknologi fermentasi, anaerobik digester (biogas). Teknologi konversi biomassa menjadi energi panas kemudian dapat diubah menjadi energi mekanis dan listrik, antara lain teknologi pembakaran dan gasifikasi. biomasa meliputi kayu, limbah pertanian/perkebunan/hutan, komponen organik dari industri dan rumah tangga. (DESDM, 2003).

Sebagai negara agraris, Indonesia mempunyai potensi energi biomassa yang

besar. Pemanfaatan energi biomassa sudah sejak lama dilakukan dan termasuk energi tertua yang peranannya sangat besar khususnya di pedesaan. Diperkirakan 35% dari total konsumsi energi nasional berasal dari biomassa. Energi yang dihasilkan telah digunakan untuk berbagai tujuan antara lain untuk kebutuhan rumah tangga (memasak dan industri rumah tangga), pengering hasil pertanian dan industri kayu, pembangkit listrik pada industri kayu dan gula. Produksi, luas area dan produktivitas kopi dan kakao yang berpotensi sebagai sumber biomassa untuk pengembangan energi alternatif biohidrogen (Tabel 1).

Tabel 1. Data Produksi, Luas Area, dan Produktivitas Kopi dan Kakao di Indonesia

No.	Uraian	Tahun		Laju Pertumbuhan/ Growth 2013 *) over 2012 (%)
		2012	2013*)	
I.	Produksi (Ton)			
1.	Kopi	691,163	669,064	-3,20
2.	Kakao	740,513	777,539	5,00
II	Luas Areal/Immature Area (Ha)			
1.	Kopi	1,235,289	1,193,149	-3,41
2.	Kakao	1,774,463	1,852,944	4,42
III	Produktivitas/ Yield (Kg/Ha)			
1.	Kopi	745	753	1,07
2.	Kakao	850	880	3,53

Sumber : Direktorat Jenderal Perkebunan (2013)

Keterangan : *) Angka sementara

-) Data tidak tersedia

Banyaknya produksi ini mengakibatkan kulit kopi dan kakao sebagai limbah perkebunan meningkat (Tabel 2). Darmono dan Tri Panji (1999) menyatakan bahwa limbah kulit buah kakao yang dihasilkan dalam jumlah banyak akan menjadi masalah jika tidak ditangani dengan baik. Produksi limbah padat ini mencapai sekitar 60% dari total produksi buah, dan sampai saat ini belum banyak mendapat perhatian masyarakat atau perusahaan untuk dijadikan sumber energi.

D. Potensi Biomassa Limbah Kopi

Potensi limbah kopi diperoleh dari tahapan pengolahan kopi cara kering maupun basah adalah kulit buah basah, limbah cair yang mengandung lendir, dan kulit gelondong kering maupun cangkang kering. Untuk setiap

pengolahan 100 kg buah kopi akan dihasilkan 15,95 kg (55%) biji kopi dan 13,05 kg (45%) kulit gelondong kering. Kulit gelondong kering terdiri dari kulit cangkang, lendir, dan kulit buah dengan perbandingan 11,9 : 4,9 : 28,7. Kandungan kulit gelondong kering (Tabel 2), sedangkan kandungan lendir kering tertera pada Tabel 3. (Widyotomo, 2013).

Tabel 2. Kandungan kulit gelondong kering

Kandungan Kulit Gelondong	Kadar (%)
Gula reduksi	12,4
Gula non pereduksi	2,02
Senyawa pektat	6,52
Protein kasar	20,7
Serat kasar	20,8

Sumber : Widyotomo (2013)

Tabel 3. Kandungan lendir kering

Kandungan Lendir Kering	Kadar (%)
Pektin	35
Gula pereduksi	30
Selulosa dan abu	17

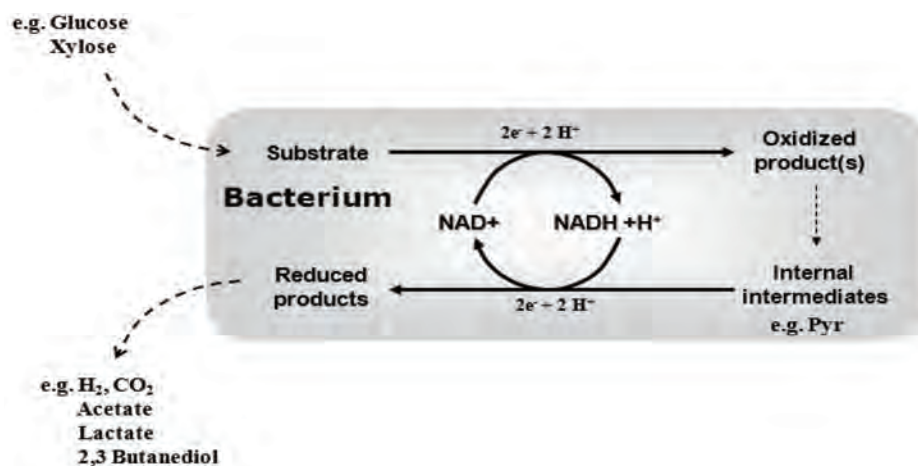
Sumber : Widyotomo (2013)

E. Proses dan Sistem Fermentasi Bahan Dalam Produksi Biohidrogen

Berdasarkan kebutuhan oksigen, fermentasi terbagi menjadi dua, yaitu fermentasi aerobik dan anaerobik. Fermentasi aerobik adalah fermentasi yang prosesnya memerlukan oksigen. Keberadaan oksigen membuat mikroorganisme dapat mencerna glukosa dan menghasilkan air, karbondioksida dan sejumlah besar energi. Fermentasi dalam proses anaerobik tidak memerlukan oksigen. Ada berbagai produk yang bisa dihasilkan dalam proses fermentasi, antara lain berbagai jenis asam (asam laktat asetat, asam butirat),

alkohol, etanol, protein, dan ester (Gambar 2) (Dunn 2002). Produk suatu hasil fermentasi dapat diubah lebih lanjut melalui proses fermentasi lain untuk menghasilkan produk akhir yang lain, seperti gas biohidrogen.

Ada tiga jenis sistem fermentasi yang dioperasikan dalam proses bioteknologi, yaitu sistem diskontinu (*batch*), kontinu, dan semikontinu (*fed-batch*). Pada sistem diskontinu, pemberian medium, nutrisi dan bakteri dilakukan hanya di awal fermentasi (tidak ada penambahan medium, nutrisi, dan bakteri selama fermentasi berlangsung). Sedangkan pada sistem kontinu, pemberian medium dan nutrisi serta pengeluaran sejumlah fraksi dari volume kultur terjadi secara terus-menerus. Sistem semikontinu adalah suatu sistem fermentasi yang medium atau substratnya ditambahkan secara kontinu selama fermentasi berlangsung tanpa mengeluarkan sesuatu dari sistem. Penggunaan beberapa substrat melalui mekanisme fermentasi dapat menghasilkan produk gas hidrogen yang berbeda (Tabel 4).



Gambar 2. Proses Selama Fermentasi (Dunn, 1959)

Tabel 4. Produksi biohidrogen dari berbagai referensi.

Tahun	Mekanisme	Substrat	Hasil	Referensi
1997	Fotofermentasi	7,5 mM asam malat	120 mL total	Eroglu, I
1997	Fotofermentasi	Limbah susu	85 mL total	Turkarlan, S
2000	Fotofermentasi	50 mM na laktat	269 mL % total	Barbosa, M. J
2006	Kombinasi	40 mM glukosa	52 mL total	Redwood, M.D
2006	Fotofermentasi	28 mM glukosa	5 mL H ₂	Fang, H.H.P
2007	Fotofermentasi	30 mM glukosa	70 mL total	Li, R. Y
2007	Fotofermentasi	30 mM na laktat	255,4 ml total	Li, R. Y
2008	Fotofermentasi	25 mM glukosa	45 mL H ₂	Penelitian sekarang
2008	Fotofermentasi	50 mM glukosa	120 mL H ₂	Penelitian sekarang
2008	Fotofermentasi	Hidrolisat limbah tebu	50 mL H ₂	Penelitian sekarang

Sumber : Widyotomo (2013)

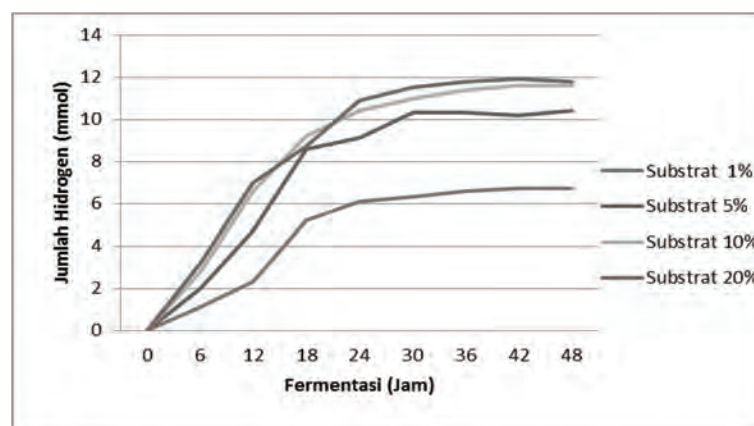
F. Penyiapan Media

Strain bakteri dari agar-agar miring, di letakan dalam sebuah erlenmeyer yang berukuran 1 liter dan berisi 500 ml air yang telah mengandung glukosa 2% dan ekstrak yeast 2%. Nutrien FeSO₄ ditambahkan sebanyak 0,35 g/l. Sebelumnya diinokulasi dialirkan gas nitrogen untuk membuat kondisi anaerob. Perkembang biakan bakteri dibiarkan selama 72 jam. Selanjutnya ditambahkan substrat limbah pertanian yang telah di haluskan sebelumnya. Substrat limbah pertanian diberikan sebesar 1% dan meningkat sampai akhir inkubasi menjadi 7%. Inkubasi dilakukan selama 1 minggu untuk menghasilkan media starter yang digunakan dalam bioreaktor. Untuk memastikan dinamika produksi biohidrogen

selama pembuatan media starter ini volume gas ditampung dalam biohidrogen bag dan volume gas dianalisis menggunakan prinsip pemindahan air sedangkan konsentrasi gas dianalisis dengan gas chromatography. Jika dipastikan terdapat produksi biohidrogen maka media ini digunakan sebagai starter.

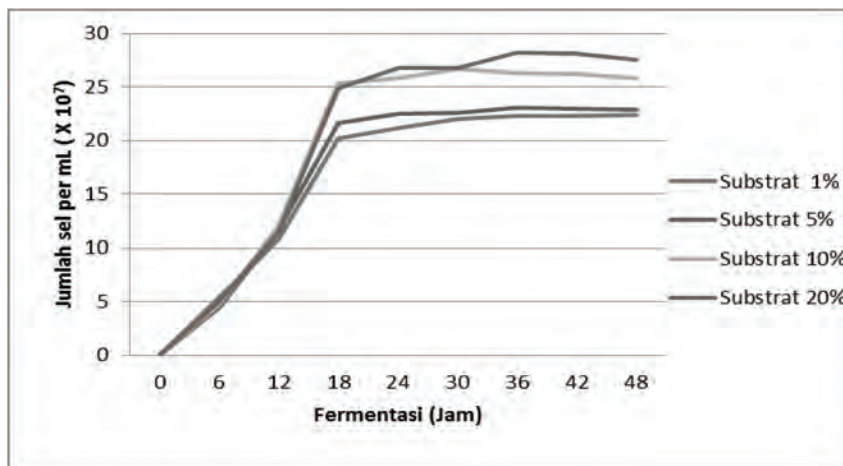
G. Produksi Biohidrogen Skala Laboratorium

Hasil perhitungan jumlah hidrogen (gambar 3) dan jumlah sel bakteri (gambar 4) selama waktu 48 jam yang dihasilkan dari fermentasi limbah organik dengan variasi konsentrasi 1%, 5%, 10% dan 20% menggunakan starter *Enterobacter aerogenes* yaitu sebagai berikut :



Gambar 3. Jumlah Hidrogen

Sumber : Agus (2010)



Gambar 4. Pertumbuhan sel bakteri

Sumber : Agus (2010)

Berdasarkan gambar 3 dan 4 maka Jumlah hidrogen terbanyak diperoleh pada konsentrasi substrat 20%. Hal ini terjadi karena semakin banyak substrat maka akan semakin meningkatkan aktivitas metabolisme sel-sel bakteri, dan secara anaerob fakultatif dihasilkan hydrogen oleh aktivitas bakteri penghasil H₂. Sedangkan berdasarkan hasil perhitungan

jumlah sel bakteri menunjukkan bahwa pertumbuhan sel bakteri berbanding lurus dengan jumlah hidrogen yang dihasilkan (gambar 4). Produksi hidrogen melalui proses non-fotosintetik memiliki beberapa keuntungan antara lain tidak memerlukan cahaya matahari sehingga bisa berlangsung sepanjang hari.

Tabel 5. Perbandingan kemampuan beberapa strain produksi H₂

Jenis Mikroba	Temperatur Inkubasi (°C)	Substrat	Laju Produksi H ₂ Mmol/l.jam	Yield Produksi H ₂ Mol/mol Substrat
Termotoga Elfii	65	Glukosa	3,3	3
Caldi Sacharolyticus	70	Glukosa, Sukrosa	8-25	2,7-3,3
C. Sacharolyticus	70	Pati	27	3,7
Clostridium Spp	37	Glukosa, silosa	7-31	1,4-2,0
Enterobakter aerogenes	37	Glukosa	21-31	0,6-1,0
Lumpur aktif	37	Glukosa-sukrosa	26-30	1,7-2,0

Sumber : Mahyudin dan Kusnandar (2006)

Perbandingan beberapa strain superior produksi H₂ terlihat pada Tabel 5, perbandingan kemampuan beberapa strain produksi H₂, *Enterobacter aerogenes* dengan inkubasi 38°C yang berarti butuh energi lebih kecil dibandingkan strain berinkubasi lebih tinggi. Sedangkan dibanding dengan *Clostridium spp.* yang laju produksi dan yield serta suhu inkubasi sama tetapi penanganannya lebih sulit (*strict anaerob*), maka *E. Aerogenes* lebih menjanjikan untuk kedepan sebagai strain produksi H₂.

PENUTUP

Potensi kandungan limbah kakao dan kopi dapat dihidrolisis secara kimiawi maupun secara biologi untuk menghasilkan gula reduksi seperti glukosa dan xylosa. Glukosa dan xylosa yang diperoleh dari proses hidrolisis dapat difermentasi lebih lanjut untuk menghasilkan hidrogen. Jumlah produksi hidrogen (H₂) yang dihasilkan dapat didasarkan pada peningkatan pertumbuhan jumlah sel bakteri yang digunakan. Proses fermentasi oleh bakteri yang terjadi dalam produksi H₂ dapat berhenti sesuai dengan kandungan nutrisi substrat yang ada, sehingga lamanya waktu fermentasi dan

ketersediaan substrat secara kontinyu akan berpengaruh pada jumlah kumulatif hidrogen (H₂) yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus, C. 2010. Pengelolaan Bahan Organik: Peran Dalam Kehidupan dan Lingkungan. UGM Yogyakarta.
- Darmono & Tri Panji. 1999. Penyediaan Kompos Kulit Buah Kakao Bebas Phytosphthora palmivora. Warta Penelitian Perkebunan. V (1). : 33-38.
- Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (DESDM), 2003, *Kebijakan Pengembangan Energi Terbarukan dan Konservasi Energi (Energi Hijau)*.
- Ditjenbun. 2013. Statistik Perkebunan Indonesia.
- Dunn S. (2002), Hydrogen futures: toward a sustainable energy sistem. *Int J Hydrogen Energy* 2002;27:235-64
- Hiraishi AK, Urata, & Satoh T. 1995. A new genus of marine budding phototropic bacteria, *Rhodobium* gen Nov, which includes *Rhodobium orientis* sp. Nov, and *Rhodobium marinum* cob. Nov. *Int. Systematic Bacteriology* 45:226-234.
- Ito T, Nakashimada Y, Senba K, Matsui T & Nishio N. Hydrogen and ethanol production from glycerol-containing wastes discharged after Biodiesel manufacturing process. *J Biosci Bioeng.* 2005;100(3):260–265. doi: 10.1263/jbb. 100.260.
- Kirtay, E. 2011. Recent Advances In Production of Hydrogen From Biomass. *Energy Conversion And Management* 52:1778-1789.
- Mahyudin AR & Koesnandar, 2006, *Biohydrogen Production: Prospects And Limitations To Practical Application*, Akta Kimindo Vol. 1 No. 2 April 2006: 73-78
- Rachman, M A. 1997. Peningkatan Produksi Gas Hidrogen pada Fermentasi Glukosa oleh *Enterobacter aerogenes*. *Bioteknologi Biomasa BPPT*. Jakarta.
- Syamsiro, M., Saptoadi, H., Tambunan, B.H. & Pambudi, A.N., 2012, *A Preliminary Study on Use of Cocoa Pod Husk as a Renewable Source of Energy in Indonesia*, *Energy for Sustainable Development* 16, pp. 74-77, Elsevier, 2012.
- Wang J & Wan W. 2009. Factors influencing fermentative hydrogen production: a review. *Int J Hydrogen Energy*;3 4(2): 799 - 811.
- Widyotomo S. 2013. Perkembangan Teknologi Diversifikasi Limbah Kopi Menjadi Produk Bernilai Tambah. *Review Penelitian Kopi dan Kakao* 1 (1) 2013; 62-79
- Yokoi,H., Tokushige,T., Hirose,J., Hayashi,S. & Takasaki,Y.,1997 : *J.Ferment. Bioeng.*83, 484-491
- Zhang ML, Fan Y, Xing Y, Pan C, Zhang G & Lay J. 2009. Enhanced Biohydrogen Production from Cornstalk Wastes with Acidification Pretreatment by Mixed Anaerobic Cultures. *Int J Hydrogen Energy*;31(4):250-254.

