

Review:Efektivitas *Dark Fermentation*, *Photo Fermentation* , dan Kombinasi Keduanya dalam Mengkonversi Sampah Menjadi Hidrogen

**Budi Setya Wardhana¹⁾, Farrah Fadhillah Hanum^{1)*}, Zen Adi Laksana²⁾,
Siti Jamilatun¹⁾ , dan Annisa Vada Febriani¹⁾**

¹⁾Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Ahmad Yani, Banguntapan, Bantul, D.I. Yogyakarta, 55191, Indonesia;

²⁾Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia.

*Corresponding Author: farrah.hanum@che.uad.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan populasi dan gaya hidup modern telah meningkatkan jumlah sampah global, termasuk di Indonesia yang memiliki populasi besar. Pengolahan sampah secara biologis menawarkan peluang untuk menghasilkan hidrogen sebagai energi terbarukan melalui *dark fermentation* dan *photo fermentation*, serta kombinasi keduanya. *Dark fermentation* menghasilkan hidrogen secara anaerob tanpa cahaya, sedangkan *photo fermentation* menggunakan energi cahaya untuk meningkatkan produksi hidrogen dari produk samping *dark fermentation*. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas ketiga metode tersebut, dengan hasil tertinggi pada kombinasi *dark* dan *photo fermentation*, menghasilkan 112,3 mL H₂/gr substrat pada suhu optimal 55°C. *Photo fermentation* meningkatkan produksi hidrogen sebesar 30% dari hasil *dark fermentation*. Penggunaan mikroba termofilik dan sinar matahari juga meningkatkan efisiensi proses. Hasil ini menunjukkan potensi besar dalam pengembangan energi terbarukan berbasis sampah.

Kata kunci: *Dark fermentation*; *Photo fermentation*; Hidrogen; Sampah; Kombinasi fermentasi

ABSTRACT

The increase in population and modern lifestyle has raised the amount of global waste, including in Indonesia, which has a large population. Biological processing of waste offers the opportunity to produce hydrogen as renewable energy through dark fermentation and photofermentation, as well as a combination of both. Dark fermentation produces hydrogen anaerobically without light, whereas photofermentation uses light energy to enhance hydrogen production from the byproducts of dark fermentation. This study evaluates the effectiveness of the three methods, with the highest result in the combination of dark and photofermentation, producing 112.3 mL of H₂/g substrate at an optimal temperature of 55 °C. Photofermentation increases hydrogen production by 30% from the results of dark fermentation. The use of thermophilic microbes and sunlight also increases the efficiency of the process. This result shows great potential in the development of renewable energy based on waste.

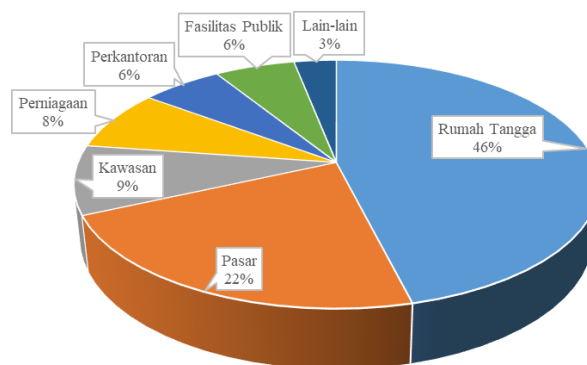
Keyword: *Dark fermentation*; *Photo fermentation*; Hydrogen; Waste; Combination fermentation

1. PENDAHULUAN

Peningkatan populasi yang pesat dan perubahan gaya hidup modern yang konsumtif telah secara signifikan meningkatkan jumlah sampah dunia dalam beberapa tahun terakhir (Permata et al., 2024). Menurut Sensus pada tahun 2020, Indonesia memiliki populasi sebesar 270,20 juta jiwa, menjadikannya negara dengan jumlah penduduk terbesar kelima di dunia (Badan Pusat Statistik, 2021). Pada kuartal keempat tahun 2021, Produk Domestik Bruto (PDB) Indonesia tumbuh sebesar 5,02% lebih besar dari tahun 2020 (Badan Pusat Statistik, 2022). Seiring dengan ekspansi ekonomi dan pertumbuhan populasi, Indonesia menghasilkan sampah dengan jumlah besar setiap hari (Idris et al., 2024). Meskipun demikian, pembangunan infrastruktur masih menghadapi tantangan, terutama dalam pengelolaan sampah. Di kota-kota besar, 60% sampah dikelola dengan metode *open dumping*, sementara hanya 10%

yang dikelola melalui *sanitary landfill* dan 30% sisanya menggunakan metode lain (Damayanti et al., 2021).

Menurut perkiraan *World Bank*, tingkat akumulasi sampah global diperkirakan akan meningkat dari 2,01 miliar ton pada tahun 2016 menjadi 3,40 miliar ton per tahun pada tahun 2050 (Kaza et al., 2018). Berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) pada pertengahan tahun 2024, jumlah sampah nasional telah mencapai 31,9 juta ton dan terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi di Indonesia. Dari jumlah tersebut, hanya sekitar 63,3% sampah yang telah dikelola, sementara 35,67% sisanya belum dikelola dengan baik (Humas BRIN, 2024). Data menunjukkan bahwa sumber sampah di Indonesia beragam, seperti ditampilkan pada Gambar 1. dengan beragamnya sumber berkontribusi terhadap jumlah sampah nasional.

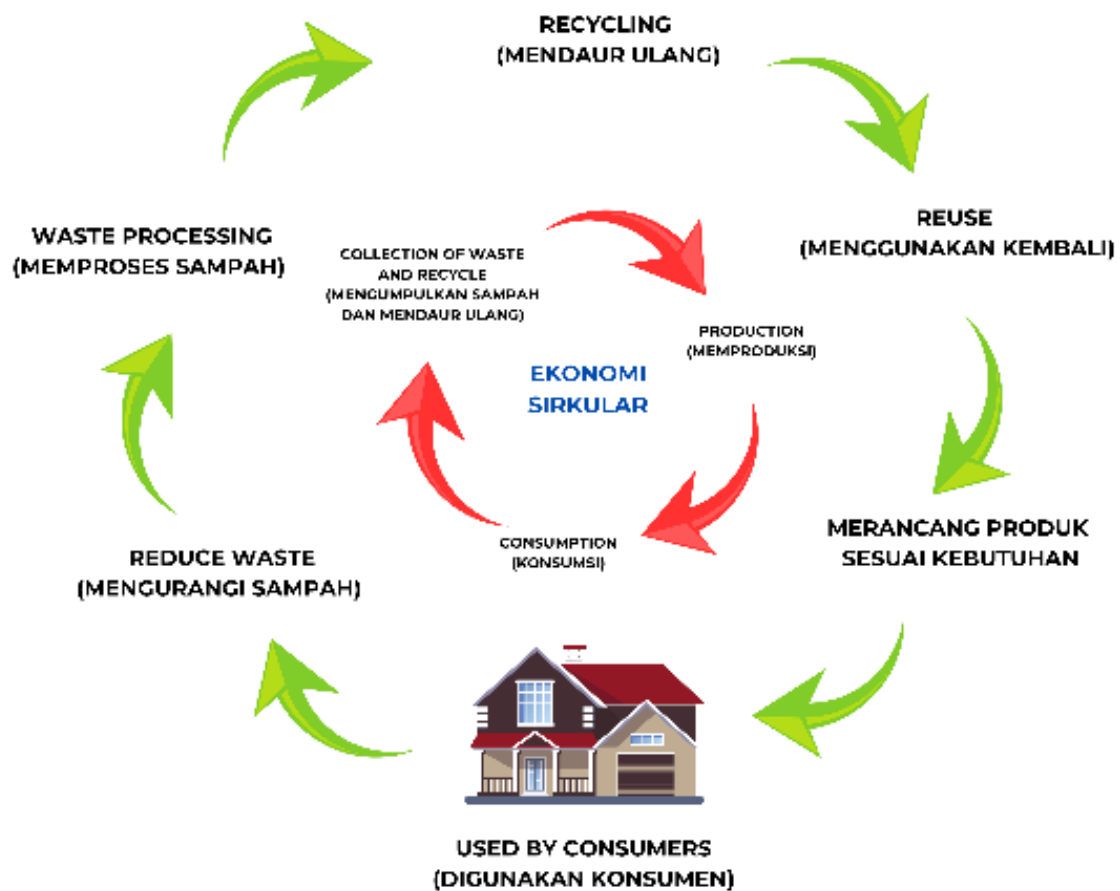


Gambar 1. Komposisi Sampah di Indonesia Berdasarkan Sumber Sampah
Sumber : (Romianingsih, 2023)

Berdasarkan Gambar 1, mayoritas sampah di Indonesia dihasilkan oleh sektor rumah tangga, yaitu sebanyak 46%, atau hampir setengah dari total jumlah sampah nasional. Hal ini menunjukkan perlunya solusi yang efektif untuk mengatasi masalah sampah rumah tangga secara berkelanjutan guna mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Meskipun sering mendapatkan stigma negatif dalam masyarakat, sampah sebenarnya bukanlah masalah, melainkan sumber bahan bakar alternatif (Edwards, 2021). Dengan metode konversi yang tepat, sampah dapat diolah untuk menghasilkan bahan bakar yang bersih sehingga dapat memberikan manfaat bagi lingkungan dan masyarakat (Gordon et al., 2022).

Bahan bakar alternatif yang dapat dihasilkan dari sampah salah satunya adalah dengan mengubahnya menjadi hidrogen, yang dapat digunakan sebagai sumber energi bersih dan berkelanjutan (Kamyab et al., 2019). Hidrogen memiliki kandungan energi tinggi (122 kJ/g) dan merupakan bahan bakar bersih serta berkelanjutan, menjadikannya alternatif potensial pengganti bahan bakar fosil. Dibandingkan hidrokarbon, hidrogen menghasilkan energi 2,75 kali lebih besar, dengan produk pembakaran utama berupa air, yang dapat didaur ulang (Samrot et al., 2023). Hidrogen tidak menghasilkan CO₂ atau gas berbahaya, sehingga semakin dilirik dalam kebijakan energi hijau, terutama untuk bahan bakar alternatif terbarukan (Wadjeam et al., 2019).

Terdapat beberapa cara untuk mengubah sampah menjadi hidrogen, salah satunya adalah melalui proses biologis, yang cukup sering digunakan karena biayanya yang terjangkau dan ramah lingkungan. Proses ini dapat beroperasi pada suhu dan tekanan ambien serta membutuhkan energi yang lebih sedikit (Dulta et al., 2022). Dengan memanfaatkan sampah, metode ini mendukung konsep ekonomi sirkular seperti Gambar 2, di mana daur ulang sampah berkontribusi pada produksi hidrogen sebagai sumber energi.



Gambar 2. Konsep Siklus Ekonomi Sirkular
Sumber : (Sharma et al., 2020)

Ekonomi sirkular merupakan sistem di mana sumber daya tidak terbuang dan lingkungan terus dipulihkan. Dalam model ini, produk dan sumber daya tetap berputar melalui proses daur ulang, pembuatan kompos, pemulihan, penggunaan kembali, dan pemeliharaan. Dengan memutuskan keterkaitan antara aktivitas ekonomi dan pemanfaatan sumber daya terbatas, ekonomi sirkular dapat mengatasi berbagai masalah, seperti polusi, limbah, hilangnya keanekaragaman hayati, dan perubahan iklim (Adami & Schiavon, 2021).

Artikel ini bertujuan untuk mengkaji potensi konversi sampah menjadi hidrogen sebagai sumber energi bersih dan berkelanjutan, serta mengevaluasi efektivitas proses biologis dalam menghasilkan hidrogen dari sampah. Dengan memahami mekanisme konversi dan karakteristik material yang digunakan, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi pengelolaan sampah yang lebih efisien dan berkelanjutan, sekaligus mendukung upaya dalam menghadapi tantangan lingkungan yang semakin kompleks.

2. PROSES BIOLOGIS DALAM MENGUBAH SAMPAH MENJADI SUMBER ENERGI HIDROGEN (H₂)

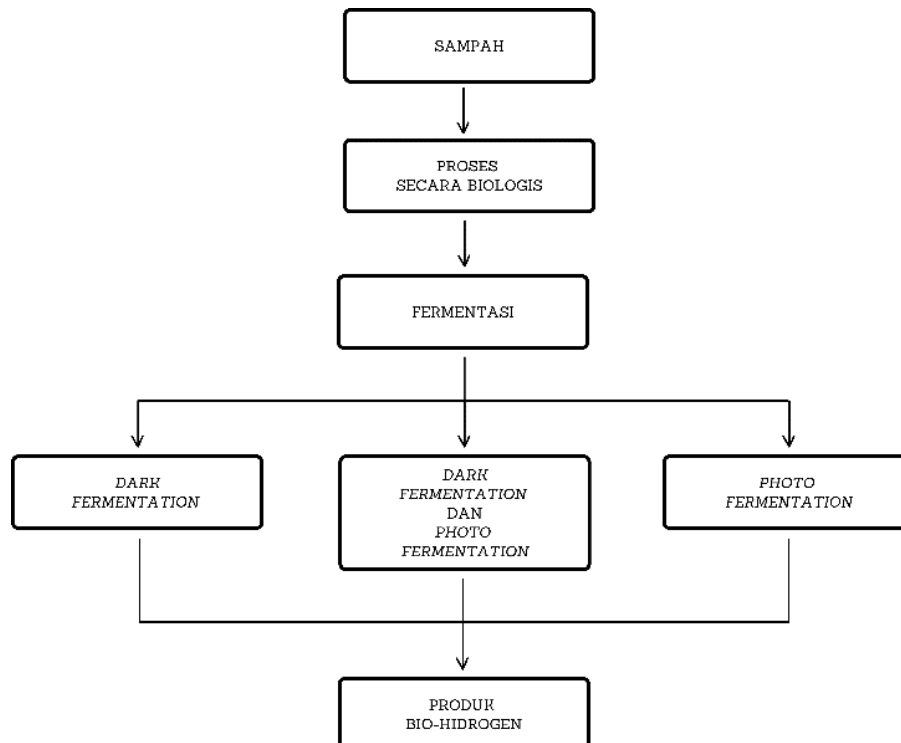
Proses biologis untuk produksi hidrogen (H₂) memanfaatkan mikroorganisme, seperti bakteri atau jamur, untuk menguraikan bahan organik dan menghasilkan hidrogen sebagai produk sampingan. Proses ini menjadi pilihan yang banyak digunakan karena lebih ramah lingkungan, tidak memerlukan bahan kimia berbahaya, serta menggunakan energi yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan metode lain seperti metode kimia atau fisika. Adapun beberapa penelitian yang telah dilakukan dalam mengubah sampah menjadi hidrogen dirangkum pada tabel 1.

Tabel 1. Produksi Hidrogen dari Berbagai Jenis Sampah Menggunakan Proses Biologis

Jenis Sampah	Metode	Jenis Mikroorganisme	Suhu (°C)	pH	Reaktor	Total Yield H ₂	Referensi
Plastik	<i>Dark fermentation</i>	<i>Anaerobic sludge</i>	36	5,5	<i>Batch</i>	-	(Moreno-Andrade et al., 2015)
Sisa Makanan	<i>Dark fermentation</i>	<i>Heat pretreated sludge</i>	37	4,0 - 4,6	<i>Batch</i>	39,14 ml H ₂ /g sampah makanan 0,25 ± 0,04 mol H ₂ /mol glukosa	(Han et al., 2015)
Jerami Padi	<i>Photo fermentation</i>	<i>Rhodopseudomonas rubra</i>	37	7	<i>Batch</i>	1,73 mol H ₂ /mol glukosa	(Dinesh et al., 2019)
Sekam Padi	<i>Dark fermentation dan Photo fermentation</i>	<i>Bacillus cereus (KR809374) dan Rhodobacter sphaeroides</i>	37	7	<i>Batch</i>	111 ml H ₂ /g gula total	(Dinesh et al., 2019)
Keju Whey	<i>Dark fermentation</i>	<i>Anaerobic sludge</i>	55	7	<i>Batch</i>	788,6 ± 238,4 ml H ₂ /g COD	(Kargi et al., 2012)
Karton	<i>Dark fermentation dan Photo fermentation</i>	<i>Anaerobic sludge dan Purple non-sulfur bacteria</i>	37	-	<i>Up-flow intermitted stirring tank reactors (UISTR)</i>	2,62 mol H ₂ /mol hexose	(Elsharkawy et al., 2019)
Tepung Jagung	<i>Dark fermentation dan Photo fermentation</i>	<i>Clostridium acetobutylicum dan Rhodobacter sphaeroides</i>	32 ±	7	<i>Repeated fed-batch reactor</i>	-	(Zagrodnik & Łaniecki, 2017)
Melon dan Semangka	<i>Dark fermentation</i>	<i>Heat treated Anaerobic sludge</i>	36	5,5 – 6,0	<i>Leaching bed reactor</i>	-	(Turhal et al., 2019)
Jerami Padi	<i>Dark fermentation</i>	<i>Clostridium pasteurianum (MTCC116)</i>	37 ±	7,5	<i>Batch</i>	47,6 ml H ₂ /g gula total	(Srivastava et al., 2017)
Batang Jagung	<i>Photo fermentation</i>	<i>Mixed culture</i>	30	7	<i>Batch</i>	2,6 mol H ₂ /mol gula total	(Jiang et al., 2016)
Singkong	<i>Dark fermentation dan Photo fermentation</i>	<i>Mixed culture dan Rhodobacter sphaeroides ZX-5</i>	30 - 37	6,8 – 7,0	<i>Sequential Batch</i>	810 ml H ₂ /g bahan baku	(Zong et al., 2009)
Sisa Makanan Restoran	<i>Dark fermentation</i>	<i>Escherichia cloacae</i>	37 ±	5,0 – 6,0	<i>Batch</i>	155,2 ml H ₂ /g volatile solid	(Xiao et al., 2013)
Apel	<i>Photo fermentation</i>	<i>HAU-M1</i>	30,5	7,1	<i>Batch</i>	112 mL/g total solid	(Lu et al., 2016)

Jenis Sampah	Metode	Jenis Mikroorganisme	Suhu (°C)	pH	Reaktor	Total Yield H ₂	Referensi
Sisa Makanan	<i>Dark fermentation</i> dan <i>Photo fermentation</i>	<i>Mixed culture</i> dan <i>Rhodobacter sphaeroides</i> ZX-5	30 - 37	6,8 – 7,0	<i>Sequential Batch</i>	671 ml H ₂ /g bahan baku	(Zong et al., 2009)
Gandum	<i>Dark fermentation</i> dan <i>Photo fermentation</i>	<i>Anaerobic sludge</i> dan <i>Rhodobacter sphaeroides</i> (NRRL-B1727)	-	-	<i>Continuous</i>	0,45 mol H ₂ /mol acetate	(Ozmihci & Kargi, 2010)
Jerami Jagung	<i>Photo fermentation</i>	<i>Rhodobacter sphaeroides</i> HY01	30	7,1 – 7,8	<i>Batch</i>	3,56 mol H ₂ /mol gula pereduksi	(Wang et al., 2018)

Berdasarkan Tabel 1, dapat kita ketahui bahwa beragam jenis sampah dapat diubah menjadi sumber energi berupa hidrogen melalui proses biologis yang melibatkan mikroorganisme. Jenis mikroorganisme yang digunakan pun beragam, dan kondisi operasi seperti pH dan suhu disesuaikan dengan jenis mikroorganisme tersebut untuk mengoptimalkan produksi hidrogen. Mayoritas penelitian menggunakan reaktor *batch*, namun beberapa juga menggunakan reaktor *continuous* dan reaktor *Up-flow Intermittent Stirring Tank Reactors (UISTR)*. Adapun total yield hidrogen (H₂) yang dihasilkan dari setiap jenis sampah cukup bervariasi. Untuk mempermudah pemahaman, diagram alir proses konversi sampah menjadi hidrogen melalui tahapan biologis dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Proses Konversi Sampah Menjadi Hidrogen Secara Biologis

Secara garis besar, proses biologis yang paling banyak digunakan untuk produksi *bio-hidrogen* dengan memanfaatkan sampah sebagai bahan baku utama adalah proses fermentasi. Jenis fermentasi yang umumnya digunakan meliputi *dark fermentation* (fermentasi gelap), *photofermentation* (fermentasi terang), serta kombinasi keduanya, yaitu gabungan antara *dark fermentation* dan

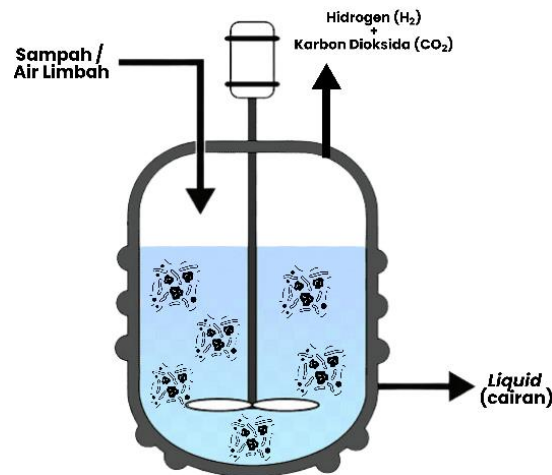
photofermentation. Setiap proses ini melibatkan mikroorganisme khusus yang dapat mengkonversi sampah menjadi hidrogen sebagai produk.

3. FERMENTASI DAN PERANNYA DALAM MENGHASILKAN HIDROGEN (H₂) DARI SAMPAH SECARA BIOLOGIS

Fermentasi adalah proses yang berlangsung tanpa oksigen dan berperan penting dalam menghasilkan hidrogen, yang merupakan sumber energi bersih dan terbarukan dengan potensi besar untuk mendukung ekonomi rendah karbon. Dalam metode ini, mikroorganisme digunakan untuk memecah limbah organik, menghasilkan hidrogen sebagai produk sampingan tanpa membutuhkan oksigen. Proses ini tidak hanya efisien, tetapi juga ramah lingkungan, menjadikannya pilihan yang baik untuk menghasilkan energi terbarukan (Dari et al., 2024; Nobre et al., 2024).

3.1 *Dark Fermentation* (Fermentasi Gelap)

Salah satu metode yang paling efektif untuk memproduksi hidrogen dari sampah organik dan anorganik adalah *dark fermentation* (fermentasi gelap) (D'Silva et al., 2023). *Dark fermentation* adalah proses biologis yang memanfaatkan bakteri *anaerob* (bakteri yang hidup tanpa oksigen) seperti *Clostridium* dan *Enterobacterium* untuk mengubah sampah menjadi hidrogen (Talapko et al., 2023). Dalam proses ini, bakteri tersebut menggunakan bahan organik dan anorganik, seperti glukosa dan sukrosa, sebagai sumber makanan dalam kondisi tanpa oksigen. Selama fermentasi yang terjadi di lingkungan gelap, bakteri ini menghasilkan berbagai produk, termasuk hidrogen, asam lemak, dan alkohol. Proses *dark fermentation* tidak membutuhkan cahaya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Hal ini membedakan fermentasi gelap dari metode *photo fermentation*, yang bergantung pada sinar matahari untuk memproduksi (Hossain et al., 2023).



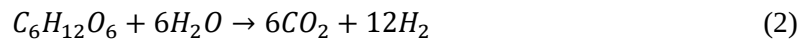
Gambar 4. Diagram skematik dari proses *dark fermentation* untuk produksi hidrogen dari sampah atau air limbah.

Secara kimia, reaksi utama dalam *dark fermentation* melibatkan pengurangan proton (H⁺) menjadi hidrogen gas (H₂). Berikut adalah beberapa reaksi kimia utama dalam proses ini:

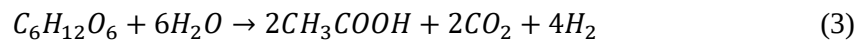
- a. **Produksi hidrogen (H₂):** Proton (H⁺) direduksi menjadi gas hidrogen dengan reaksi:



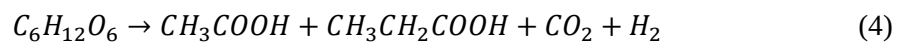
- b. **Reaksi glukosa menghasilkan hidrogen:** Glukosa ($C_6H_{12}O_6$) bereaksi dengan air (H_2O), menghasilkan karbon dioksida (CO_2) dan hidrogen (H_2) dengan reaksi :



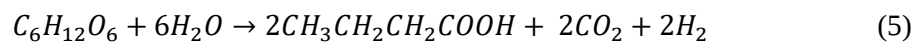
- c. **Jalur asam asetat:** Glukosa ($C_6H_{12}O_6$) diuraikan menjadi asam asetat (CH_3COOH), karbon dioksida (CO_2) dan hidrogen (H_2) dengan reaksi:



- d. **Jalur asam propionat:** Glukosa ($C_6H_{12}O_6$) menghasilkan asam asetat (CH_3COOH), asam propionat (CH_3CH_2COOH), karbon dioksida (CO_2) dan hidrogen (H_2) dengan reaksi:



- e. **Jalur asam butirat:** Glukosa ($C_6H_{12}O_6$) menghasilkan asam butirat ($CH_3CH_2CH_2COOH$), karbon dioksida (CO_2) dan hidrogen (H_2) dengan reaksi:

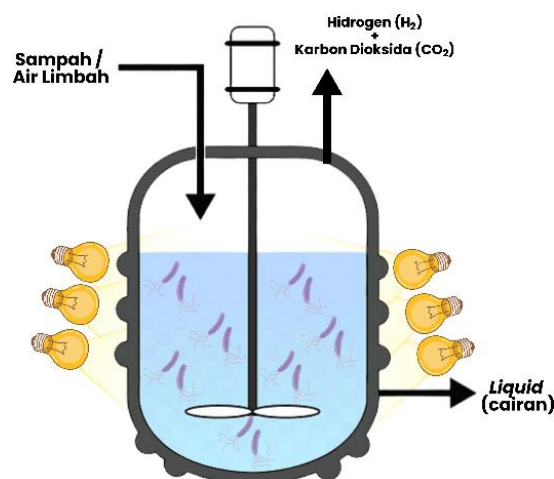


(Osman et al., 2023)

Sampah kaya karbohidrat, seperti sampah yang berasal dari pertanian dan makanan, lebih efektif menghasilkan hidrogen dibandingkan sampah dengan kandungan protein atau lipid yang tinggi. Proses *pre-treatment* pada bahan baku seperti dengan menggunakan enzim atau metode kimiawi, dapat meningkatkan efisiensi produksi hidrogen dalam proses ini (Perat et al., 2024).

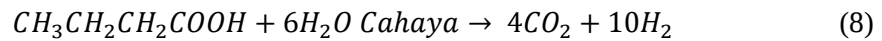
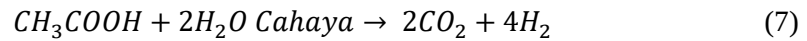
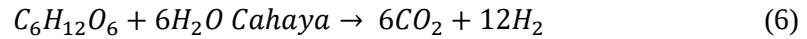
3.2 *Photo fermentation* (Fermentasi Terang)

Photo fermentation adalah suatu proses biologis yang menghasilkan hidrogen melalui bakteri fotosintetik, khususnya *purple non-sulfur bacteria (PNSB)*. Proses ini berlangsung di bawah sinar cahaya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, dengan adanya sumber karbon, sementara oksigen dan nitrogen tidak tersedia (Gupta et al., 2024).



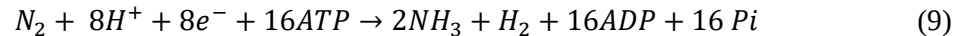
Gambar 5. Diagram skematik dari proses *photo fermentation* untuk produksi hidrogen dari sampah atau air limbah.

Sumber cahaya dapat berasal dari matahari atau sumber buatan, sedangkan sumber karbon dapat berupa gula sederhana atau *volatile fatty acids* (VFA) (Harirchi et al., 2022). Menurut persamaan (6-8), satu mol glukosa secara teori dapat menghasilkan 12 mol hidrogen:



(Osman et al., 2023)

Meskipun demikian, jika dibandingkan dengan *dark fermentation*, kecepatan laju degradasi VFA oleh bakteri fotosintetik lebih lambat. PNSB cenderung lebih memilih VFA sebagai substrat dibandingkan glukosa, yang terlihat dari laju produksi hidrogen yang lebih cepat saat menggunakan VFA (Monroy & Buitrón, 2020). Dalam proses *photo fermentation*, produksi hidrogen didorong oleh enzim *nitrogenase*, yang mana ini berbeda dengan *dark fermentation* yang mengandalkan enzim *hidrogenase*. Persamaan (9) menunjukkan bahwa satu mol nitrogen diubah menjadi amonia oleh enzim *nitrogenase*, dengan melibatkan 8 ion hidrogen (H^+), 8 elektron (e^-), dan 16 mol ATP (*Adenosine Triphosphate*), yang menghasilkan satu mol hidrogen. ATP sebagai sumber energi sel, menyediakan energi untuk reaksi ini dan terurai menjadi ADP (*Adenosine Diphosphate*) dan Pi (*Fosfat Inorganik*). Reaksi ini dapat dituliskan sebagai berikut:



Akan tetapi produksi hidrogen jauh lebih efisien jika dalam keadaan kondisi tanpa nitrogen, seperti yang dijelaskan dalam persamaan (10):



(Osman et al., 2023)

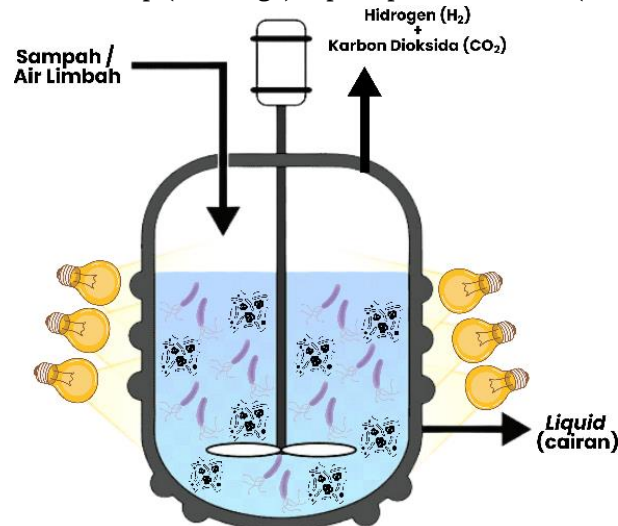
Efisiensi cahaya merupakan indikator penting dalam mengevaluasi tingkat konversi energi dalam sistem ini. Oleh karena itu, baik intensitas cahaya maupun panjang gelombang yang digunakan sangat penting dalam desain dan pengoperasian reaktor *photo fermentation*, yang menjadikan proses ini lebih rumit dibandingkan dengan *dark fermentation* (Barghash et al., 2021).

3.3 Kombinasi *dark fermentation* dan *photo fermentation*

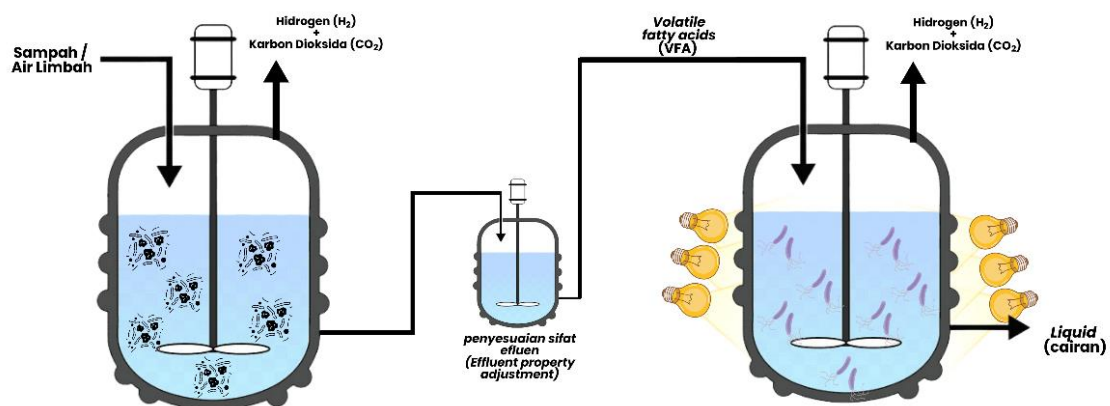
Dark fermentation dan *photo fermentation* adalah dua teknik utama yang umum digunakan untuk memproduksi hidrogen (H_2). Namun, masing-masing proses tersebut memiliki kelemahan, seperti rendahnya hasil hidrogen, tingginya biaya produksi, dan rendahnya pemulihan energi, terutama karena penumpukan asam organik selama proses berlangsung (Qu et al., 2022). Oleh karena itu, penggabungan *dark fermentation* dan *photo fermentation* sering dilakukan untuk menjadi solusi yang efisien untuk mengatasi masalah ini. Pada proses tersebut, material sisa dari *dark fermentation* digunakan sebagai bahan baku pada tahap *photo fermentation* (Sağır & Hallenbeck, 2019).

Volatile fatty acids (VFA) yang terdapat dalam residu cair dari hasil *dark fermentation* dapat dimanfaatkan oleh *purple non-sulfur bacteria* (PNSB) untuk memproduksi hidrogen (H_2) melalui tahap *photo fermentation*. Hal ini memungkinkan oksidasi bahan baku lebih efisien dan menghasilkan lebih

banyak hidrogen (H_2) (Ghosh et al., 2020). Adapun kombinasi antara kedua proses ini dapat dilakukan secara satu tahapan (*single stage*) melalui penanaman bersama mikroorganisme *dark fermentation* dan *photo fermentation* pada reaktor yang sama seperti pada Gambar 6, atau melalui bioreaktor yang beroperasi secara berurutan dua tahap (*two stage*) seperti pada Gambar 7 (Niño-Navarro et al., 2020).



Gambar 6. Diagram skematik dari kombinasi proses *dark fermentation* dan *photo fermentation* secara satu tahapan (*single stage*) untuk produksi hidrogen dari sampah atau air limbah.



Gambar 7. Diagram skematik dari kombinasi proses *dark fermentation* dan *photo fermentation* secara dua tahapan (*two stage*) untuk produksi hidrogen dari sampah atau air limbah.

Kombinasi antara *dark fermentation* dan *photo fermentation* dapat menghasilkan produk hidrogen (H_2) maksimum secara teoritis sebesar 12 mol per mol glukosa, yang lebih maksimal hasilnya dibandingkan jika dilakukan secara terpisah. Reaksi kimia yang terjadi dalam kedua proses ini adalah:

Dark fermentation:

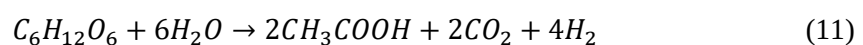
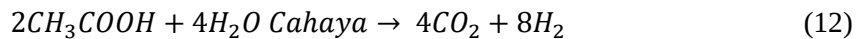


Photo fermentation:



(Albuquerque et al., 2024)

Pada *dark fermentation* meskipun banyak produk sampingan yang terbentuk, secara teoritis dapat diperoleh 4 mol produk H_2 per mol glukosa jika asam asetat adalah satu-satunya produk sampingan. Dalam skema proses kombinasi antara *dark fermentation* dan *photo fermentation* berurutan, 4 mol H_2 dapat dihasilkan oleh proses *dark fermentation*, dan asam asetat yang terbentuk dapat digunakan digunakan untuk *photo fermentation*, yang menghasilkan produk tambahan sebanyak 8 mol H_2 . Secara keseluruhan, total teoritisnya bisa mencapai 12 mol H_2 per mol glukosa. Namun, hasil yang diperoleh di lapangan sering kali lebih rendah karena sebagian dari bahan baku digunakan untuk pertumbuhan dan aktivitas metabolisme mikroorganisme (Seifert et al., 2018).

Jika *dark fermentation* dan *photo fermentation* digabungkan dalam satu tahap (*single stage*) menggunakan campuran mikroorganisme (*mixed culture*), proses ini bisa mengurangi produk sampingan seperti *volatile fatty acids* (VFA) dan meningkatkan produksi H_2 . Metode ini lebih sederhana dan menguntungkan jika dibandingkan dengan metode dua tahap (*two stage*), karena dapat mengurangi langkah-langkah yang diperlukan. Selain itu, penggabungan ini dapat membantu menyeimbangkan proses pengasaman dari *dark fermentation* dengan proses alkalisasi pada *photo fermentation*, tanpa perlu mengatur pH secara terpisah. Dengan cara ini, kebutuhan untuk pengenceran tambahan juga berkurang, sehingga lebih hemat biaya (Sekoai et al., 2021).

Sedangkan pada skema dua tahap (*two stage*) umumnya langkah awal yang dilakukan adalah *dark fermentation* menggunakan bakteri *anaerob* seperti *Clostridium*, yang dapat menghasilkan hidrogen bersama produk sampingan seperti asam organik rantai pendek (asam laktat, asam butirat, asam asetat) dan alkohol. Langkah kedua yang dilakukan adalah *photo fermentation* menggunakan bakteri fotosintetik *non-sulfur* seperti *rhodobacter* atau *rhodospseudomonas*, yang dapat mengubah asam organik rantai pendek menjadi H_2 . Kombinasi gabungan ini dapat menghasilkan hidrogen yang lebih efisien (Sharma et al., 2020).

3.4. Perbandingan masing-masing proses fermentasi

Untuk lebih memahami perbedaan tersebut, Tabel 2 di bawah ini menyajikan perbandingan antara kelebihan dan kekurangan dari masing-masing proses fermentasi hidrogen.

Tabel 2. Kelebihan dan Kekurangan Proses Fermentasi Hidrogen

Proses	Kelebihan	Kekurangan
<i>Dark Fermentation</i>	Proses sederhana dan tidak memerlukan cahaya.	Produksi hidrogen relatif rendah (4 mol H_2 per mol glukosa).
	Dapat menggunakan berbagai sumber sampah organik, termasuk sampah pertanian dan makanan.	Menghasilkan produk sampingan berupa asam organik yang dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme.
	Tidak memerlukan kondisi khusus seperti cahaya.	Efisiensi konversi energi lebih rendah.
	Ramah lingkungan dan cocok untuk aplikasi skala besar.	Penurunan pH media, membutuhkan kontrol tambahan.
<i>Photo Fermentation</i>	Produksi hidrogen lebih tinggi (8-12 mol H_2 per mol glukosa).	Memerlukan cahaya (baik alami atau buatan).
	Dapat menggunakan asam organik dari <i>dark fermentation</i> sebagai substrat.	Laju produksi hidrogen lebih lambat daripada <i>dark fermentation</i> .

Proses	Kelebihan	Kekurangan
	Efisiensi energi lebih tinggi karena menggunakan bakteri fotosintetik.	Desain reaktor lebih kompleks, membutuhkan kontrol intensitas dan panjang gelombang cahaya yang optimal.
	Tidak menghasilkan produk sampingan yang menghambat.	Biaya lebih tinggi karena kebutuhan akan cahaya dan penanganan bakteri fotosintetik.
Kombinasi <i>Dark</i> dan <i>Photo Fermentation</i>	Potensi produksi hidrogen maksimal (12 mol H ₂ per mol glukosa).	Sistem lebih kompleks dan memerlukan koordinasi yang tepat antara dua tahapan proses.
	Efisiensi konversi substrat lebih baik karena menggunakan asam organik dari <i>dark fermentation</i> di <i>photo fermentation</i> .	Proses dapat lebih mahal dan memerlukan biaya tambahan untuk mengelola dua tahap fermentasi.
	Mengurangi produk sampingan yang menghambat seperti VFA dari <i>dark fermentation</i> .	Tantangan teknis lebih besar terkait integrasi kedua proses ini.
	Potensi stabilisasi pH secara alami selama proses gabungan.	Risiko kesalahan operasional lebih tinggi dibanding proses tunggal.

Berdasarkan Tabel 2. dapat kita ketahui bahwa *dark fermentation* lebih sederhana, tetapi *photo fermentation* lebih efisien dalam hal produksi hidrogen. Kombinasi keduanya memberikan hasil yang paling optimal tetapi juga menambah kerumitan dan biaya.

4. KESIMPULAN

Peningkatan populasi mengakibatkan peningkatan jumlah sampah, yang menjadi tantangan serius dalam pengelolaan limbah. Salah satu solusi untuk mengatasi masalah ini adalah dengan mengkonversi sampah menjadi hidrogen melalui proses biologis, seperti *dark fermentation*, *photo fermentation*, dan kombinasi keduanya. Proses ini tidak hanya efektif dalam mengurangi volume sampah yang dihasilkan, tetapi juga menghasilkan hidrogen sebagai sumber energi bersih. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut dalam metode konversi ini sangat penting untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan pengelolaan sampah, serta mendukung upaya pencapaian tujuan energi terbarukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adami, L., & Schiavon, M. (2021). From Circular Economy to Circular Ecology : A Review on the Solution of Environmental Problems through Circular Waste Management Approaches. *Sustainability*, 13(925), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su13020925>
- Albuquerque, M. M., Sartor, G. de B., Martinez-Burgos, W. J., Scapini, T., Edwiges, T., Soccol, C. R., & Medeiros, A. B. P. (2024). Biohydrogen Produced via Dark Fermentation: A Review. *Methane*, 3(3), 500–532. <https://doi.org/10.3390/methane3030029>
- Badan Pusat Statistik. (2021). Hasil Sensus Penduduk 2020. In *Berita Resmi Statistik* (Issue 27). <https://www.bps.go.id/id/pressrelease/2021/01/21/1854/hasil-sensus-penduduk--sp2020--pada-september-2020-mencatat-jumlah-penduduk-sebesar-270-20-juta-jiwa-.html>
- Badan Pusat Statistik. (2022). Pertumbuhan Ekonomi Indonesia Triwulan IV-2021. *Berita Resmi Statistik*, 14, 1–16. <https://www.bps.go.id/id/pressrelease/2022/02/07/1911/ekonomi-indonesia-triwulan-iv-2021-tumbuh-5-02-persen--y-on-y-.html>
- Barghash, H., Okedu, K. E., & Balushi, A. Al. (2021). Bio-Hydrogen Production Using Land fi ll Leachate Considering Different Photo-Fermentation Processes. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.644065>

- D'Silva, T. C., Khan, S. A., Kumar, S., Kumar, D., Isha, A., Deb, S., Yadav, S., Illathukandy, B., Chandra, R., Vijay, V. K., Subbarao, P. M. V., Bagi, Z., Kovács, K. L., Yu, L., Gandhi, B. P., & Semple, K. T. (2023). Biohydrogen production through dark fermentation from waste biomass: Current status and future perspectives on biorefinery development. *Fuel*, 350, 128842. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128842>
- Damayanti, P., Moersidik, S. S., & Haryanto, J. T. (2021). Waste to Energy in Sunter , Jakarta , Indonesia : Plans and Challenges. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1–5. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/940/1/012033>
- Dari, D. N., Freitas, I. S., Izaías, F., Leandro, R., Melo, F., Moreira, K., Sousa, S., Gonçalves, P., Junior, D. S., Cavalcante, G., Sim, F., Serpa, J. D. F., Souza, M. C. M. De, & Santos, C. S. (2024). An Updated Review of Recent Applications and Perspectives of Hydrogen Production from Biomass by Fermentation : A Comprehensive Analysis. *Biomass*, 4(1), 132–163. <https://doi.org/10.3390/biomass4010007>
- Dinesh, G. H., Nguyen, D. D., Ravindran, B., Chang, S. W., Vo, D. V. N., Bach, Q. V., Tran, H. N., Basu, M. J., Mohanrasu, K., Murugan, R. S., Swetha, T. A., Sivapraksh, G., & Arun, A. (2019). Simultaneous biohydrogen (H₂) and bioplastic (poly- b -hydroxybutyrate-PHB) productions under dark , photo , and subsequent dark and photo fermentation utilizing various wastes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(10), 5840–5853. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.036>
- Dulta, K., Adeola, A. O., Ashaolu, S. E., Banji, T. I., & Ighalo, J. O. (2022). Biohydrogen production and its bioeconomic impact: a review. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 4(3), 219–230. <https://doi.org/10.1007/s42768-022-00109-z>
- Edwards, F. (2021). Overcoming the social stigma of consuming food waste by dining at the Open Table. *Agriculture and Human Values*, 38(2), 397–409. <https://doi.org/10.1007/s10460-020-10176-9>
- Elsharkawy, K., Alalm, M. G., Fujii, M., Afify, H., Tawfik, A., & Elsamadony, M. (2019). Paperboard mill wastewater treatment via combined dark and LED mediated fermentation in the absence of external chemical addition. *Bioresource Technology*, 295, 122312. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122312>
- Ghosh, S., Dutta, S., & Chowdhury, R. (2020). Ameliorated hydrogen production through integrated dark-photo fermentation in a flat plate photobioreactor: Mathematical modelling and optimization of energy efficiency. *Energy Conversion and Management*, 226(July), 113549. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113549>
- Gordon, J. A., Balta-Ozkan, N., & Nabavi, S. A. (2022). Beyond the triangle of renewable energy acceptance: The five dimensions of domestic hydrogen acceptance. *Applied Energy*, 324, 119715. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119715>
- Gupta, S., Fernandes, A., Lopes, A., Grasa, L., & Salafranca, J. (2024). Photo-Fermentative Bacteria Used for Hydrogen Production. *Applied Sciences*, 14(3), 1191. <https://doi.org/10.3390/app14031191>
- Han, W., Ye, M., Zhu, A. J., Zhao, H. T., & Li, Y. F. (2015). Bioresource Technology Batch dark fermentation from enzymatic hydrolyzed food waste for hydrogen production. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, 191, 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.120>
- Harirchi, S., Wainaina, S., Sar, T., Ali, S., & Parchami, M. (2022). Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas , hydrogen or volatile fatty acids (VFAs): a review. *Bioengineered*, 13(3), 6521–6557. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2035986>
- Hossain, S., Saha, C. K., Ismail, M., Reza, T., Kabir, K. B., & Kirtania, K. (2023). Prospects and

- challenges of renewable hydrogen generation in Bangladesh. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(54), 20588–20612. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.059>
- Humas BRIN. (2024). *11,3 Juta Ton Sampah di Indonesia Tidak Terkelola dengan Baik*. Badan Riset Dan Inovasi Nasional. <https://brin.go.id/drid/posts/kabar/113-juta-ton-sampah-di-indonesia-tidak-terkelola-dengan-baik>
- Idris, M., Setyawan, M., & Mufrodi, Z. (2024). Teknologi Insinerasi Sebagai Solusi Pengolahan Sampah Perkotaan dan Pemulihan Energi : A Review. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi 2024, April*. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/22490/10451>
- Jiang, D., Ge, X., Zhang, T., & Liu, H. (2016). Photo-fermentative hydrogen production from enzymatic hydrolysate of corn stalk pith with a photosynthetic consortium. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(38), 16778–16785. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.129>
- Kamyab, S., Ataei, S. A., Tabatabaee, M., & Mirhosseini, S. A. (2019). Optimization of bio-hydrogen production in dark fermentation using activated sludge and date syrup as inexpensive substrate. *International Journal of Green Energy*, 16(10), 763–769. <https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1631828>
- Kargi, F., Eren, N. S., & Ozmihci, S. (2012). Bio-hydrogen production from cheese whey powder (CWP) solution : Comparison of thermophilic and mesophilic dark fermentations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(10), 8338–8342. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.162>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0 Introduction - "Snapshot of Solid Waste Management to 2050." Overview booklet. *Urban Development Series*, 1–38. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Lu, C., Zhang, Z., Ge, X., Wang, Y., & Zhou, X. (2016). Bio-hydrogen production from apple waste by photosynthetic bacteria HAU-M1. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(31), 13399–13407. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.101>
- Monroy, I., & Buitrón, G. (2020). Production of polyhydroxybutyrate by pure and mixed cultures of purple non-sulfur bacteria: A review. *Journal of Biotechnology*, 317(May), 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.04.012>
- Moreno-Andrade, I., Moreno, G., Kumar, G., & Buitrón, G. (2015). Biohydrogen production from industrial wastewaters. *Water Science & Technology*, 71(1), 105–111. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.471>
- Niño-Navarro, C., Chairez, I., Christen, P., Canul-Chan, M., & García-Peña, E. I. (2020). Enhanced hydrogen production by a sequential dark and photo fermentation process: Effects of initial feedstock composition, dilution and microbial population. *Renewable Energy*, 147, 924–936. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.024>
- Nobre, C., Mateos-pedrero, C., Longo, A., Rijo, B., Brito, P., & Ferreira, P. (2024). Renewable Hydrogen from Biomass : Technological Pathways and Economic Perspectives. *ENERGIES*, 17(14), 3530. <https://doi.org/10.3390/en17143530>
- Osman, A. I., Deka, T. J., Baruah, D. C., & Rooney, D. W. (2023). Critical challenges in biohydrogen production processes from the organic feedstocks. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 8383–8401. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00965-x>
- Ozmihci, S., & Kargi, F. (2010). Bio-hydrogen production by photo-fermentation of dark fermentation effluent with intermittent feeding and effluent removal. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(13), 6674–6680. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.090>
- Perat, L., Escudi, R., Bernet, N., Richard, C., Mathilde, J., Juge, M., & Trably, E. (2024). New insights on waste mixing for enhanced fermentative hydrogen production. *Process Safety and*

Environmental Protection, 188, 1326–1337. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.06.006>

- Permata, A. D., Malaya, A. P., & Kamal, U. (2024). STRATEGI PENGURANGAN PENGGUNAAN PLASTIK MELALUI IMPLEMENTASI ZERO WASTE MENUJU GAYA HIDUP RAMAH LINGKUNGAN. *Jurnal Multidisiplin Ilmu Akademik*, 1(3), 371–383. <https://doi.org/10.61722/jmia.v1i3.1471>
- Qu, X., Zeng, H., Gao, Y., Mo, T., & Li, Y. (2022). Bio-hydrogen production by dark anaerobic fermentation of organic wastewater. *Frontiers in Chemistry*, 10(September), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.978907>
- Romianingsih, N. P. W. (2023). Waste to energy in Indonesia: opportunities and challenges. *Journal of Sustainability, Society and Eco-Welfare (JSSEW)*, 1(1), 60–69. <https://doi.org/10.61511/jssew.v1i1.2023.180>
- Sağır, E., & Hallenbeck, P. C. (2019). Photofermentative Hydrogen Production. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Biohydrogen, Second Edition* (pp. 141–157). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64203-5.00006-X>
- Samrot, A. V., Rajalakshmi, D., Sathiyasree, M., Saigeetha, S., Kasipandian, K., Valli, N., Jayshree, N., Prakash, P., & Shobana, N. (2023). A Review on Biohydrogen Sources, Production Routes, and Its Application as a Fuel Cell. *Sustainability (Switzerland)*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/su151612641>
- Seifert, K., Zagrodnik, R., Stodolny, M., & Łaniecki, M. (2018). Biohydrogen production from chewing gum manufacturing residue in a two-step process of dark fermentation and photofermentation. *Renewable Energy*, 122, 526–532. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.105>
- Sekoai, P. T., Ghimire, A., Ezeokoli, O. T., Rao, S., Ngan, W. Y., Habimana, O., Yao, Y., Yang, P., Yiu Fung, A. H., Yoro, K. O., Daramola, M. O., & Hung, C. H. (2021). Valorization of volatile fatty acids from the dark fermentation waste Streams-A promising pathway for a biorefinery concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110971. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110971>
- Sharma, S., Basu, S., Shetti, N. P., & Aminabhavi, T. M. (2020). Science of the Total Environment Waste-to-energy nexus for circular economy and environmental protection : Recent trends in hydrogen energy. *Science of the Total Environment*, 713, 136633. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136633>
- Srivastava, N., Srivastava, M., Kushwaha, D., Gupta, V. K., Manikanta, A., Ramteke, P. W., & Mishra, P. K. (2017). Efficient dark fermentative hydrogen production from enzyme hydrolyzed rice straw by *Clostridium pasteurianum* (MTCC116). *Bioresource Technology*, 238, 552–558. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.077>
- Talapko, D., Talapko, J., Eri, I., & Škrlec, I. (2023). Biological Hydrogen Production from Biowaste Using Dark Fermentation , Storage and Transportation. *ENERGIES*, 16(8), 1–16. <https://doi.org/10.3390/en16083321>
- Turhal, S., Turanbaev, M., & Argun, H. (2019). Hydrogen production from melon and watermelon mixture by dark fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(34), 18811–18817. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.011>
- Wadjeam, P., Reungsang, A., Imai, T., & Plangklang, P. (2019). Co-digestion of cassava starch wastewater with buffalo dung for bio-hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 14694–14706. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.138>
- Wang, X., Fang, Y., Wang, Y., & Hu, J. (2018). Single-stage photo-fermentative hydrogen production from hydrolyzed straw biomass using *Rhodobacter sphaeroides*. *International Journal of*

Hydrogen Energy, 43(30), 13810–13820. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.057>

Xiao, L., Deng, Z., Fung, K. Y., & Ng, K. M. (2013). Biohydrogen generation from anaerobic digestion of food waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(32), 13907–13913. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.08.072>

Zagrodnik, R., & Łaniecki, M. (2017). Hydrogen production from starch by co- culture of *Clostridium acetobutylicum* and *Rhodobacter sphaeroides* in one step hybrid dark- and photofermentation in repeated fed-batch reactor. *Bioresource Technology*, 224, 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.060>

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(10), 1458–1463. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.06.008>