

BAREFOOT: OPTIMALISASI *FOOD WASTE TREATMENT* SEBAGAI RAW MATERIAL PRODUKSI HIDROGEN DALAM ENERGI TERBARUKAN UNTUK Mendukung *GREEN ENERGY AND CIRCULAR ECONOMY*

A.Tiara Maharani¹, Amelia Bahetha^{2*}, Muhammad Dimmas Firdaus³ dan Enggar Ira Elyana⁴

¹Teknik Kimia, FTIRS, ITS

²Kimia, FSAD, ITS

³Teknik Material dan Metalurgi, FTIRS, ITS

⁴ Kimia, FSAD, ITS

*E-mail : ameliabahetha@gmail.com

Abstrak

Pertumbuhan industri yang pesat membawa perubahan besar dalam berbagai aspek kehidupan, termasuk sektor pangan, namun juga menyebabkan peningkatan jumlah limbah makanan. Menurut data FAO (Organisasi Pangan dan Pertanian Dunia), sekitar sepertiga dari makanan yang diproduksi setiap tahun terbuang. Limbah makanan seperti nasi dan kulit pisang menjadi masalah besar. Data dari Badan Pusat Statistik Indonesia tahun 2023 menunjukkan bahwa produksi pisang mencapai 9.335.232 unit, dengan limbah kulit pisang mencapai 40% atau 3.734.092 kulit per tahun. Selain itu, nasi sisa menyumbang 276.000 ton limbah per tahun. Dalam mengatasi masalah ini dan memenuhi kebutuhan energi bersih, kami menginovasikan BAREFOOT yakni teknologi yang memanfaatkan limbah nasi dan kulit pisang dari restoran, hotel, cafe, dan catering menjadi produk hidrogen. Teknologi ini memanfaatkan limbah nasi dan kulit pisang untuk menghasilkan hidrogen melalui sistem fermentasi gelap (*dark fermentation*) dan sel elektrolisis mikroba (*microbial electrolysis cell*). Proses hidrolisis limbah ini menghasilkan glukosa sebesar 9,35%, yang cocok untuk fermentasi gelap. Sel elektrolisis mikroba kemudian meningkatkan produksi hidrogen dengan mengonversi asam organik volatil dari fermentasi gelap. BAREFOOT mampu menghasilkan 8378013 liter hidrogen per tahun dari 766.395 kg limbah nasi dan kulit pisang, menjadikan limbah makanan sebagai raw material sumber energi hidrogen berkelanjutan dan mendukung pencapaian energi bersih. Hasil komersialisasi hidrogen dengan harga Rp66.400,00 per liter, BAREFOOT mencapai *payback* pada 1,6 tahun. Pada sepuluh tahun pertama, nilai NPV sebesar Rp3.223.424.185,68, dan IRR sebesar 59% yang menunjukkan nilai positif mengindikasikan bahwa BAREFOOT dengan produk berupa hidrogen merupakan bisnis yang layak untuk diimplementasikan dalam jangka panjang.

Keywords: Energi Terbarukan, *Food Waste*, Hidrogen, Kulit Pisang, Limbah Nasi.

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan industri yang pesat membawa dampak besar pada berbagai sektor kehidupan, termasuk pangan, tetapi juga menyebabkan peningkatan limbah makanan. Data Organisasi Pangan dan Pertanian Perserikatan Bangsa-Bangsa (FAO) menunjukkan bahwa sekitar sepertiga makanan yang diproduksi setiap tahun terbuang, menyebabkan kerugian sekitar 1 triliun USD. Sumber daya yang digunakan untuk produksi makanan yang terbuang ini mencakup hampir seperempat lahan pertanian dan pupuk global, serta berkontribusi pada emisi gas rumah kaca sebesar 3,3 Gigaton CO₂ (Barrera dkk., 2021). Di Indonesia, contoh limbah makanan meliputi nasi, yang merupakan makanan utama. Nasi sisa mencapai 276.000 ton limbah per tahun. Selain itu, data Badan Pusat Statistik Indonesia tahun 2023 menunjukkan bahwa produksi pisang mencapai 9.335.232 unit, dengan 40% atau 3.734.092 kulit pisang menjadi limbah setiap tahun (BPS., 2024).

Ramos (2021) menemukan bahwa limbah nasi mengandung 37,5% selulosa (Ramos dkk., 2021). Kulit pisang mengandung 12% selulosa (Ramadhany dkk., 2021). Selulosa adalah biopolimer paling melimpah di dunia (Sabara dkk., 2022), dan biokonversi selulosa dapat menjadi pendekatan potensial untuk menghasilkan hidrogen terbarukan dari bahan organik. Penggabungan fermentasi gelap dengan bioelektrohidrogenesis, seperti sel elektrolisis mikroba, menawarkan cara yang menjanjikan untuk produksi hidrogen, yang dianggap sebagai bahan bakar masa depan karena sifatnya yang bersih dan dapat dihasilkan dari sumber terbarukan. Hidrogen memiliki energi tinggi sebesar 122 kJ/g, 2,75 kali lebih besar dari bahan bakar hidrokarbon, dan

dapat digunakan dalam sel bahan bakar untuk menghasilkan listrik. Namun, teknologi produksi hidrogen saat ini, seperti reformasi uap gas alam, perengkahan termal, atau gasifikasi batu bara, tidak ramah lingkungan. Oleh karena itu, produksi hidrogen secara biologis lebih prospektif (Singh dkk., 2022).

Diperlukan inovasi untuk mengoptimalkan produksi hidrogen dengan memanfaatkan limbah nasi dan kulit pisang sebagai sumber energi terbarukan. Fermentasi gelap dapat digunakan untuk menghasilkan hidrogen melalui pencernaan anaerobik, yang mengubah substrat menjadi gas seperti hidrogen, karbon dioksida, dan asam organik yang mudah menguap, tanpa memerlukan proses metanisasi (Solowski dkk., 2019). Substrat ini menggunakan glukosa, yang diperoleh melalui hidrolisis fisik, seperti perebusan. Proses mencampur limbah nasi dan kulit pisang dengan rasio 7:3 dan perebusan selama 50 menit, dapat diperoleh glukosa sekitar 9,35% (Swantara dkk., 2018). Sistem ini dapat dikombinasikan dengan sel elektrolisis mikroba untuk meningkatkan degradasi biomassa dan meningkatkan produksi hidrogen (Yu dkk., 2018).

Maka dari itu, diusulkan inovasi BAREFOOT, yang mengoptimalkan produksi hidrogen dari limbah nasi dan kulit pisang melalui sistem hibrida yang menggabungkan fermentasi gelap dan sel elektrolisis mikroba. Inovasi ini mendukung Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) nomor 7, yaitu menyediakan energi bersih dan terjangkau, nomor 12 untuk konsumsi dan produksi bertanggung jawab, serta nomor 13 untuk mengatasi perubahan iklim. Diharapkan, BAREFOOT dapat membantu mencapai target Net Zero Emission 2060.

2. METODE

2.1 Bentuk Penelitian

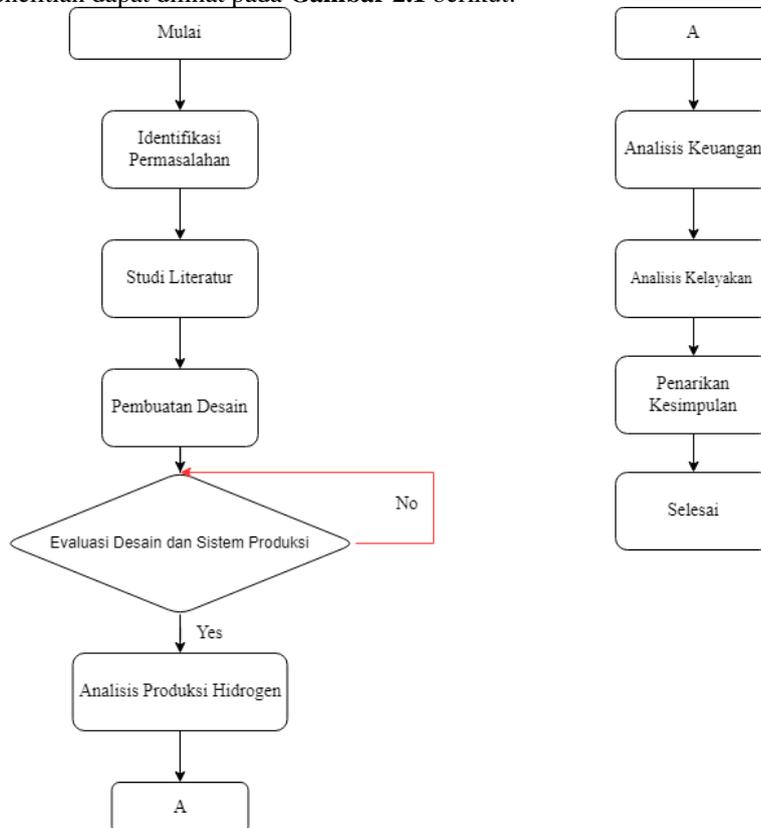
Penelitian ini terdiri dari tiga tahap, yaitu studi literatur dengan metode meta-analisis, pemodelan dengan menggunakan software SketchUp, dan analisis ekonomi dengan metode financial projection.

2.2 Sumber Data

Sumber data dalam karya ilmiah ini dibagi menjadi data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari hasil pemodelan dan perhitungan ekonomi untuk analisis kelayakan sistem. Data sekunder berasal dari pengolahan data dari referensi terpercaya. Data-data tersebut akan dipilah dan kemudian disajikan secara detail, disertai dengan sumber-sumber ilmiah sebagai dasar dari gagasan yang diangkat. Hasil kajian dalam tulisan ini nantinya dapat dikembangkan dan diaplikasikan lebih lanjut.

2.3 Diagram Alir

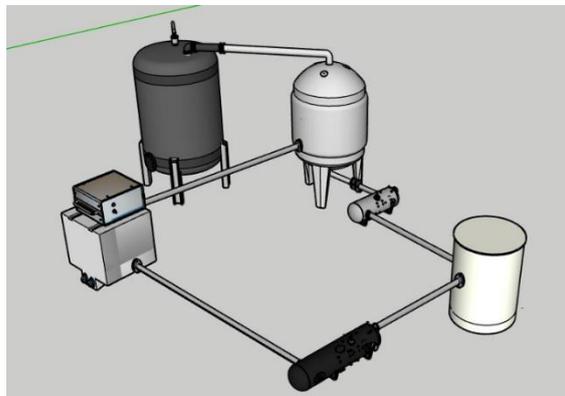
Diagram alir penelitian dapat dilihat pada **Gambar 2.1** berikut:



Gambar 2.1 Diagram Alir Metode Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, limbah nasi dan limbah pisang, terlebih dahulu akan dikumpulkan untuk dilakukan *pre-treatment* seperti penambahan NaOH atau senyawa alkali lainnya agar meningkatkan akses bakteri ke substrat karbohidrat yang lebih kompleks (Nury dkk., 2023). Pada percobaan ini proses *dark fermentation* akan dibantu oleh bakteri *Clostridium butyricum* dipilih karena kemampuannya dalam menghasilkan hidrogen melalui fermentasi anaerobik. Bakteri ini dapat mengubah gula sederhana menjadi asam asetat dan hidrogen (Herlambang dkk., 2016). Kemudian limbah nasi dan pisang dimasukkan ke dalam bioreaktor untuk proses fermentasi gelap menggunakan *Clostridium butyricum* selama 24 jam untuk menghasilkan gas hidrogen, metana, dan karbondioksida. Berikut ini adalah rancangan desain dari BAREEFOOT, terdapat beberapa komponen seperti *pre-treatment tank*, *bioreactor*, *microbial electrolysis cell*, *power storage*, *filter CO₂*, hidrogen fuel cell, dan hidrogen tank. Berdasarkan data substrat limbah nasi dan kulit pisang yang dihasilkan terdapat 276.000 ton limbah nasi dan 373 ton kulit pisang setiap tahun sehingga apabila dikalkulasikan, maka dapat diperkirakan limbah yang dihasilkan sebanyak 766.395 kg/hari. Adapun kapasitas *pre-treatment tank* dan *bioreactor* yang telah didesain berkapasitas 150 kg, lalu kapasitas hidrogen tank sebesar 60.000 L. **Gambar 3.1** dibawah ini merupakan 3D modelling dari BAREFOOT yang dirancang menggunakan SketchUp.

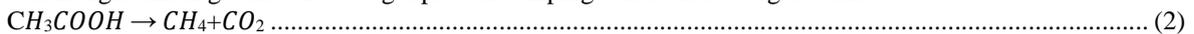


Gambar 3.1 Rancangan desain BAREFOOT

Pada sistem BAREFOOT terjadi reaksi kimia dalam proses DF (*Dark Fermentation*) substrat limbah nasi dan kulit pisang menggunakan bakteri *Clostridium butyricum* yang dapat menghasilkan biohidrogen sebagai berikut.



Berdasarkan reaksi di atas, diketahui bahwa dalam proses DF juga dihasilkan asam asetat yang dapat terurai dan menghasilkan gas metana sebagai produk samping dari reaksi sebagai berikut.



Produk samping yang dihasilkan oleh proses DF selanjutnya diolah kembali melalui MEC untuk menghasilkan tambahan yield biohidrogen melalui reaksi pada anoda dan katoda sebagai berikut.



Melalui reaksi elektroda di atas, maka dihasilkan tambahan *yield* biohidrogen dan energi listrik untuk melaksanakan reaksi pada MEC secara berulang-ulang (Yu dkk., 2014).

Limbah nasi yang dihasilkan di Indonesia sebesar 276.000.000 kg/tahun sedangkan produksi pisang sebesar 9.335.232 kg/tahun dimana limbah kulit pisang dari produksi pisang tersebut sebesar 40% atau 3.734.092,8 kg/tahun. Pada proses DF, selulosa yang dibutuhkan dalam sekali kultur sebanyak 766395 kg. Lalu, hasil samping dari DF diproses kembali menggunakan MEC untuk menghasilkan yield hidrogen yang lebih besar. Dalam rangkaian proses ini, kandungan selulosa pada campuran limbah nasi dan kulit pisang yakni sebesar 9,35% (Sukma, 2018). Setelah limbah tersebut melewati sistem terintegrasi antara DF dengan MEC diperoleh yield hidrogen sebesar 14,3 mmol H₂/kg selulosa setiap 24 jam (Wang dkk., 2011). Kemudian, dapat diperoleh yield hidrogen yang dihasilkan setiap jam sebagai berikut.

$$\text{selulosa sekali kultur} = \frac{9,35}{100} \times \text{jumlah limbah sekali kultur} \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{selulosa sekali kultur} = \frac{9,35}{100} \times 766395 \text{ kg} \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{selulosa sekali kultur} = 71657 \text{ kg} \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{Yield Hidrogen /hari} = \text{Yield Hidrogen} \times \text{selulosa sekali kultur} \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{Yield Hidrogen/hari} = 14,3 \frac{\text{mmol Hidrogen}}{\text{kg}} \times 71657 \text{ kg} \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{Yield Hidrogen/hari} = 1024708 \text{ mmol Hidrogen} \dots\dots\dots (10)$$

Lalu dengan mengasumsikan reaksi berlangsung dalam keadaan STP maka dapat diperoleh *yield* hidrogen per hari dalam satuan liter menggunakan persamaan gas ideal sebagai berikut.

$$P \times V = n \times R \times T \dots\dots\dots(11)$$

$$V = \frac{n \times R \times T}{P} \dots\dots\dots(12)$$

$$V = \frac{1024,708 \text{ mol} \times 0,08206 \frac{\text{L.atm}}{\text{K}} \times 273 \text{ K}}{1 \text{ atm}} \dots\dots\dots(13)$$

$$V = 95639,42 \text{ L Hidrogen/hari} \dots\dots\dots(14)$$

$$V = 22953,46 \text{ L Hidrogen/jam} \dots\dots\dots(15)$$

$$V = 22953,46 \text{ Hidrogen/hari} \times 365 \text{ hari/tahun} \dots\dots\dots(16)$$

$$V = 8378013 \text{ L/tahun} \dots\dots\dots(17)$$

Untuk mengetahui kelayakan teknologi BAREFOOT maka, dilakukan analisis ekonomi yang diawali dengan perhitungan *capital expenditure* (CAPEX) atau biaya modal. Perhitungan CAPEX menggunakan beberapa asumsi, seperti biaya tangki *pre-treatment*, bioreaktor, sel elektrolisis mikroba, sel bahan bakar hidrogen, *filter* CO₂, pipa gas, dan tangki penyimpanan hidrogen. Hasil perhitungan CAPEX ditunjukkan pada **Tabel 1** sebagai berikut.

Tabel 1. Perhitungan *Capital Expenditure* (CAPEX)

CAPEX					
No.	Item	Qty	Price/Unit	Total	
1	Tangki pre-treatment	5	Rp 34.750.000,00	Rp	173.750.000,00
2	Bioreaktor	5	Rp 56.700.000,00	Rp	283.500.000,00
4	Microbial Electrolysis Cell	5	Rp 53.982.000,00	Rp	269.910.000,00
5	Filter CO2	8	Rp 1.300.000,00	Rp	10.400.000,00
6	Pipa gas	8	Rp 1.200.000,00	Rp	9.600.000,00
7	Tangki gas Hidrogen	15	Rp 38.550.000,00	Rp	578.250.000,00
TOTAL				Rp	1.325.410.000,00

Kemudian di dalam sistem BAREFOOT juga dilakukan perhitungan biaya operasional untuk mengetahui pengeluaran selama proses berlangsung. Biaya operasional terdiri dari harga pokok penjualan (HPP) dan pengeluaran operasional (OPEX). BAREFOOT memiliki nilai HPP pada tahun pertama penjualan produk sebesar Rp 444.062.289.000,00. Nilai ini akan terus bertambah ketika terjadi peningkatan produksi setiap tahunnya. Sementara itu, OPEX yang dibutuhkan pada tahun pertama adalah sebesar Rp185.000.000,00. Hasil perhitungan HPP dan OPEX ditunjukkan pada **Tabel 2** dan **Tabel 3** sebagai berikut.

Tabel 2. Perhitungan COGS BAREFOOT

COGS					
No.	Item	Qty	Price/Unit	Total	
1.	Limbah nasi	276.000.000	Rp 1.500,00	Rp	414.000.000.000,00
2.	Limbah Kulit pisang	3.734.092,80	Rp 5.000,00	Rp	18.670.464.000,00
3	Clostridium butyricum (kg)	85140	Rp 125.000,00	Rp	10.642.500.000,00
4	NaOH (kg)	28385	Rp 25.000,00	Rp	709.625.000,00
5	Biaya pengangkutan limbah (rental truk fuso engkel)	10	Rp 3.970.000,00	Rp	39.700.000,00
TOTAL				Rp	444.062.289.000,00

Tabel 3 1. Perhitungan *Operational Expenditure* (OPEX)

OPEX					
No.	Item	Qty	Price/Unit	Total	
1	Administratif dan umum	1	Rp 5.000.000,00	Rp	5.000.000,00
2	Operasional dan perawatan	1	Rp 80.000.000,00	Rp	80.000.000,00
3	Sewa	1	Rp 75.000.000,00	Rp	75.000.000,00
4	Professional fee	1	Rp 25.000.000,00	Rp	25.000.000,00
TOTAL				Rp	185.000.000,00

BAREFOOT memproyeksikan kelayakan ekonomi secara profesional dengan menghitung beberapa parameter ekonomi, termasuk periode pengembalian modal, Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Benefit Cost Ratio (BCR). Beberapa parameter tersebut dapat mengindikasikan kelangsungan usaha

dalam beberapa tahun ke depan.

Table 4. Hasil Kelayakan Ekonomi

ECONOMIC ANALYSIS RESULT	
Nama	Nilai
Disc Rate	10%
NPV	Rp3.223.424.185,68
PP	1,671889843
BCR	0,910713186
IRR	59%

Selain itu, dengan harga hidrogen mencapai Rp66.400,00 per liter, BAREFOOT dapat mengalami periode pengembalian modal selama 1,6 tahun. Pada sepuluh tahun pertama, nilai NPV sebesar Rp3.223.424.185,68, dan IRR sebesar 59% dengan menggunakan tingkat diskonto 10%. Parameter NPV dan IRR pada proyeksi bisnis yang menunjukkan nilai positif mengindikasikan bahwa BAREFOOT dengan produk berupa hidrogen merupakan bisnis yang layak untuk diimplementasikan dalam jangka panjang (minimal sepuluh tahun ke depan). Selain itu, implementasi dan komersialisasi BAREFOOT semakin layak dengan nilai BCR yaitu sebesar 0,91.

4. KESIMPULAN

Barefoot merupakan inovasi teknologi yang memanfaatkan Limbah Nasi dan Kulit Pisang menjadi sumber energi hidrogen melalui proses dark fermentation. Berdasarkan uraian penelitian dapat disimpulkan bahwa teknologi barefoot mampu menghasilkan 8378013 liter hidrogen per tahun dari 766.395 kg limbah nasi dan kulit pisang, menjadikan limbah makanan sebagai raw material sumber energi hidrogen berkelanjutan dan mendukung pencapaian energi bersih. Kemudian hidrogen yang dihasilkan akan dikomersialkan sebagai alternatif sumber energi bersih dengan harga hidrogen mencapai Rp66.400,00 per liter, BAREFOOT mencapai *payback* 1,6 tahun. Pada sepuluh tahun pertama, nilai NPV sebesar Rp3.223.424.185,68, dan IRR sebesar 59% yang menunjukkan nilai positif mengindikasikan bahwa BAREFOOT dengan produk berupa hidrogen merupakan bisnis yang layak untuk diimplementasikan dalam jangka panjang.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) atas dukungan yang telah diberikan selama proses penyusunan dan publikasi jurnal ini. Dukungan yang kami terima, baik dalam bentuk fasilitas, bimbingan, maupun motivasi, sangat membantu kami dalam mencapai hasil yang maksimal. Kami juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Antasena ITS Team yang telah memberikan kontribusi signifikan dalam penelitian ini. Kerja sama dan dedikasi yang diberikan oleh seluruh anggota tim sangat berharga bagi kesuksesan jurnal ini. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat yang luas dan menjadi langkah awal bagi penelitian-penelitian selanjutnya.

6. DAFTAR PUSTAKA

- B. P. S. Indonesia .2024. *Produksi tanaman buah-buahan - tabel statistik*. Badan Pusat Statistik Indonesia.
- Barrera, E. L., & Hertel, T. 2021. Global food waste across the income spectrum: Implications for food prices, production and resource use. *Food Policy*, 98, 101874.
- Herlambang, A., Henky, S., & Wibowo, K., 2016. Produksi Gas Metana Dari Pengolahan Sampah Perkotaan Dengan Sistem Sel. *Jurnal Teknologi Lingkungan* 11(3),pp.389.
- Nury, Dennis, Luthfi, M.Z., dan Variyana, Y. 2023. Pengaruh Pretreatment Alkali Hidroksida Terhadap Produksi Gula Reduksi dari Limbah Kulit Kopi. *JoASCE (Journal Applied of Science and Chemical Engineering)* 1(1),pp.1–6.
- Rahmadhany, P., Oktaviani, V., & Handoko, T. (2021). Pengaruh Kandungan Selulosa dan Lignin Pada Pulp Kulit Pisang Kepok dalam Pembuatan Kertas Seni. *Prosiding Seminar Nasional*, pp. 1-5.
- Ramos, M., Laveriano, E., Sebastián, L. S., Perez, M., Jiménez, A., Lamuela-Raventos, R. M., Garrigós, M. C., & Vallverdú-Queralt, A. 2023. Rice straw as a valuable source of cellulose and polyphenols: Applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 131, pp.14–27.
- Sabara, Z., Mutmainnah, A., Kalsum, U., Afiah, I. N., Husna, I., Saregar, A., Umam, R. 2022. Sugarcane Bagasse as the Source of Nanocrystalline Cellulose for Gelatin-Free Capsule Shell. *International Journal of Biomaterials*, 2022, pp.1–8.
- Singh, A., Sevda, S., Reesh, I. A., Vanbroekhoven, K., Rathore, D., & Pant, D. 2015. Biohydrogen Production from Lignocellulosic Biomass: Technology and Sustainability. *Energies*, 8 (11)
- Sołowski, G., Konkol, I. and Cenian, A. 2019. Perspectives of Hydrogen Production from Corn Wastes in Poland by Means of Dark Fermentation. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2(26),pp.255–263.
- Sukma Sanjiwan., Wiwik, Susanah., Dira, Swantara. 2018. Pembuatan Bioetanol dari Campuran Limbah Nasi

- dan Kulit Pisang. *Indonesian E-Journal of Applied Chemistry*, 2 (6).
- Swantara, N. 2018. PEMBUATAN BIOETANOL DARI CAMPURAN LIMBAH NASI DAN KULIT PISANG. *Jurnal Harian Regional*.
- Wang, A., Sun, D., Cao, G., Wang, H., Ren, N., Wu, W.-M. and Logan, B.E. 2011. Integrated hydrogen production process from cellulose by combining dark fermentation, microbial fuel cells, and a microbial electrolysis cell. *Bioresource Technology*, 102 (5).
- Yu, Z., Leng, X., Zhao, S., Ji, J., Zhou, T., Khan, A., Kakde, A., Liu, P. and Li, X. 2018. A review on the applications of microbial electrolysis cells in anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, (255), pp. 340–348.