

Retrospectiva y Prospectiva del Desarrollo de las Generaciones de Biocombustibles

(Retrospective and Prospect of the development of Biofuel Generations)

Gerald Torrentes Espinoza¹

Campo temático: Energías renovables.

Resumen

La creciente preocupación por el medio ambiente y la necesidad imperiosa de reducir las emisiones de carbono para disminuir sus consecuencias sobre el clima global han redundado en numerosos acuerdos y compromisos entre los países tendientes a fomentar el desarrollo de energías alternativas renovables de menor impacto ambiental. Los biocombustibles de primera generación son producidos directamente a partir de cultivos, al extraer su aceite, a través del proceso de fermentación. El debate con este tipo de biocombustibles se da debido a que un incremento en la demanda de biocombustibles de primera generación conduciría a que gran cantidad de las cosechas no sean colocadas en el mercado alimenticio. Los biocombustibles de segunda generación son obtenidos de materias primas no comestibles, como la madera, desechos orgánicos y cultivos específicos, ofreciendo una mayor competitividad en el mercado en términos de su costo en relación con los combustibles fósiles existentes. Los biocombustibles de tercera generación usan microorganismos como materia prima, mientras que los biocombustibles de cuarta generación se centran en modificar genéticamente estos microorganismos para lograr una relación alta de hidrógeno a carbono. El objetivo de esta investigación es brindar un amplio panorama de las cuatro generaciones de biocombustibles líquidos. Este trabajo concluye que las metodologías que existen en la actualidad para producir biocombustibles de primera y segunda generación pronto no satisfarán la demanda de biocombustibles y en consecuencia se deben dirigir los recursos hacia la tercera y cuarta generación, con especial énfasis al desarrollo de la ingeniería genética de las materias primas.

Palabras clave: biocombustibles; generación, algas; materia prima.

¹ Universidad de Costa Rica. gtorrentes@gmail.com

Abstract

The growing concern for the environment and the urgent need to reduce carbon emissions to lessen its consequences on the global climate have resulted in numerous agreements and commitments between countries to promote the development of renewable alternative energy sources with less environmental impact. First generation biofuels are produced directly from crops, by extracting their oil, through the fermentation process. The debate with this type of biofuels occurs because an increase in the demand for first-generation biofuels would lead to many crops not being placed in the food market. Second generation biofuels are obtained from inedible feedstock, such as wood, organic waste and specific crops, offering greater competitiveness in the market in terms of their cost in relation to existing fossil fuels. Third generation biofuels use microorganisms as the raw material, while fourth generation biofuels focus on genetically modifying these microorganisms to achieve a high hydrogen to carbon ratio. The objective of this research is to provide a broad overview of the four generations of liquid biofuels. This work concludes that the methodologies that currently exist to produce first and second generation biofuels will soon not satisfy the demand for biofuels and, consequently, resources should be directed towards the third and fourth generation, with special emphasis on the development of genetic engineering of their raw materials.

Keywords: biofuels; generation; algae; feedstock.

1. Introducción

Aunque los biocombustibles tienen un gran potencial para proporcionar una ruta hacia la neutralidad de las emisiones de carbono para la producción de combustibles, los sistemas de producción de primera generación tienen considerables limitaciones económicas y ambientales. El advenimiento de los biocombustibles de segunda generación está destinado a producir combustibles a partir de biomasa lignocelulósica, que no compite con la producción de alimentos. Sin embargo, la conversión de la biomasa leñosa en azúcares fermentables requiere tecnologías costosas que implican un pretratamiento con enzimas especiales, lo que significa que los biocombustibles de segunda generación aún no se pueden producir económicamente a gran escala.

Por lo tanto, los biocombustibles de tercera generación derivados de microalgas se consideran un recurso energético alternativo viable que carece de los principales inconvenientes asociados con los biocombustibles de primera y segunda generación. Las microalgas pueden producir entre 15 y 300 veces más aceite para la producción de biodiesel que los cultivos tradicionales por área (Rizza, Smachetti, Nascimento, Salerno, & Curatti, 2017). Además, en comparación con las plantas de cultivo convencionales que generalmente se cosechan una o dos veces al año, las microalgas tienen un ciclo de cosecha muy corto que permite múltiples o continuas cosechas con rendimientos significativamente mayores. Los biocombustibles de cuarta generación se derivan de la bioconversión de organismos vivos (microorganismos y plantas) utilizando herramientas biotecnológicas. La producción de biocombustibles de cuarta generación incorpora tecnología de captura y almacenamiento de carbono que excedería todas las opciones carbono-neutras disponibles actualmente.

Este artículo proporciona una revisión de las cuatro generaciones de biocombustibles, incluidas sus ventajas, limitaciones, tecnologías y evaluaciones. Este trabajo resume las contribuciones y críticas, más pertinentes a consideración del autor sobre el desarrollo en este campo. Los principales objetivos de este trabajo son proporcionar detalles acerca de la evolución en la producción de biocombustibles, resumir y sistematizar los datos revisados por pares; y mostrar las ventajas y los inconvenientes de cada método de generación y producción de biocombustibles, con una especial atención al trabajo realizado en la investigación de algas y otros organismos bacterianos para la síntesis de nuevos biocombustibles.

2. Discusión

Los biocombustibles se clasifican en función de los biomateriales utilizados para la síntesis de cualquier combustible alternativo. Estos biomateriales pueden ser: cultivos de granos (maíz, trigo, caña de azúcar, yuca y otros cereales), residuos de cultivos (cascarilla de arroz, mazorcas de maíz, paja de trigo, rastrojo de maíz),

biomasa residual (desperdicio de alimentos, desperdicio de ganado, otros productos de desecho) o más recientemente, a partir de algas.

2.1 Biocombustibles de primera generación

El biocombustible de primera generación que se comercializa actualmente en diferentes países se produce principalmente a partir de cultivos de granos como materia prima. Se han identificado unos 350 cultivos oleaginosos como posibles fuentes para la producción de biodiésel de primera generación (Askew, 2003). Este es el factor más significativo del aumento constante en la producción de biodiesel (Atabani et al., 2012; Shahid & Jamal, 2011). La materia prima de biodiesel de primera generación se puede encontrar en cultivos de aceite vegetal comestible como la soja, coco, palma, maní, girasol, maíz, semilla de algodón, entre otros (Pinto, Guarieiro, & Razende, 2005). La producción de biodiésel de primera generación con eficiencia energética a partir de cultivos de semillas oleaginosas no es económicamente viable actualmente, por lo que se requiere más investigación y desarrollo para su producción.

2.2 Biocombustibles de segunda generación

Biocombustibles de segunda generación es el término designado para aquellos biocombustibles, incluidos el bioetanol y el biodiesel producido a partir de materiales no alimentarios como materias primas. En lo que respecta a la mejora de la tecnología de fermentación, todavía hay un gran margen de mejora para el desarrollo de microorganismos de fermentación. La prioridad debe ser la investigación y los avances tecnológicos en una más sencilla co-fermentación simultánea de azúcares de hexosa y pentosa. Definitivamente esto requerirá aplicaciones más robustas en el campo de la biología molecular y la ingeniería genética (Galazca, Tian, & Beeson, 2010). Otra tecnología alternativa podría ser el desarrollo de microorganismos de bioprocesamiento consolidados que tengan mejores capacidades catalíticas (Zhang, Luo, & Zhang, 2009).

2.3 Tercera y cuarta generación de biocombustibles.

Las algas son micro a macro plantas que juegan un papel importante en muchos ecosistemas para proporcionar alimentos y nutrientes vitales y también proveen hasta un 60 % del oxígeno necesario para todos los seres vivos (Carere, Sparling, Cicek, & Levin, 2008). Los biocombustibles de algas se consideran una fuente de energía alternativa técnicamente viable de biocombustibles de tercera generación (Hallmann, 2015; Rasala, Muto, Lee, & Jager, 2010; Rizza et al., 2017).

La producción de biomasa de microalgas se encuentra entre 15 Mg/ha año y 25 Mg/ha año (Lam & Lee, 2012). Con un supuesto de contenido de lípidos del 30 % en las células de las microalgas (sin considerar su crecimiento), esto es equivalente a una producción de lípidos de 4,5 Mg/ha año a 7,5 Mg/ha año (Tsukahara & Sawayama, 2005). Esta cantidad es mayor en comparación con la producción de aceite de soja (0,4 Mg/ha año), colza (0,68 Mg/ha año), palma aceitera (3,62 Mg/ha año) y *Jatropha curcas* (4,14 Mg/ha año) (Chisti, 2007; Lam & Lee, 2011). Entre los posibles productos de biorrefinería, el bioetanol a partir de biomasa no alimentaria podría usarse como combustible renovable en el sector automotriz (Tan & Lee, 2016).

2.3.1 Materias primas de algas

Las algas son plantas que van desde microscópicas (microalgas) hasta grandes algas (macroalgas), desde pequeños puntos verdes hasta cianobacterias más grandes y las diatomeas. Hay nueve grupos principales de algas que son cianobacterias (Cyanophyceae), algas verdes (Chlorophyceae), diatomeas (Bacillariophyceae), algas verde-amarillas (Xanthophyceae), algas doradas (Chrysophyceae), algas rojas (Rhodophyceae), algas pardas (Phaeophyceae), dinoflagelados (Dinophyceae) y picoplancton (Prasinophyceae y Eustigmatophyceae) (Hu, Sommerfield, Jarvis, & Ghirardi, 2008). Entre estos nueve grupos, las algas verdes son el grupo taxonómico más grande. En la Tabla 1 se destacan algunas especies de microalgas y su contenido de aceite.

Tabla 1. Contenido de aceite de diferentes cepas de microalgas (Fazal et al., 2018)

| Especie de microalga | Contenido de aceite (% masa en base seca) |
|---------------------------------|---|
| <i>Chlorella vulgaris</i> | 38,00 |
| <i>Chlorella emersonii</i> | 63,00 |
| <i>Chlorella protothecoides</i> | 23,00 |
| <i>Chlorella zofingiensis</i> | 54,50 |
| <i>Chlorella pyrenoidosa</i> | 30,90 |
| <i>Scenedesmus sp</i> | 21,10 |
| <i>Nannochloropsis sp.</i> | 20,00 |
| <i>Scenedesmus obliquus</i> | 43,00 |
| <i>Auxenochlorella</i> | 20,82 |
| <i>Chlorella sp.</i> | 15,60 - 25,40 |

Las cianobacterias son parte del fitoplancton marino y de agua dulce. Un estudio revisó los logros recientes en el desarrollo y la producción de biocombustibles producidos a partir de biomasa cianobacteriana (Sarsekeyeva, Zayadan, Usserbaeva, Bedbenov, & Sinetova, 2015). Muchas especies de cianobacterias naturales sintetizan una amplia gama de estructuras de ácidos grasos. Los ácidos grasos cianobacterianos (AGC) están representados principalmente por especies C16 y C18 con 0 a 3 enlaces dobles (16:0, 16:1, 18:1, 18:2 y 18:3) (Los & Mironov, 2015). Los perfiles AGC de *Synechococcus*, desarrollado en laboratorio (Ruffing & Jones, 2012) o *Cyanobacterium* sp. que se encuentra en la naturaleza (Sarsekeyeva et al., 2015), han mostrado parecer bastante apropiados para la conversión a cianodiésel.

Las modificaciones genéticas de las células de cianobacterias permiten la conversión del carbono atmosférico fijo, no solo en una biomasa cruda sino también en los productos finales deseados, que son los más adecuados para la producción de biocombustibles (Quintana, van der Krooy, van de Rhee, Voshol, & Verpoorte, 2011). Estas cianobacterias genéticamente modificadas pueden secretar productos finales metabólicos, alcanos o ácidos grasos libres en el medio de cultivo. Por lo tanto, las etapas costosas de recolección de células y la lisis celular para extraer los productos pueden omitirse (Peralta, Zhang, del Cardayre, & Keasling, 2012).

2.3.2 Sistemas de producción de algas

Las microalgas autótrofas se cultivan principalmente en tierra en grandes estanques abiertos o en los llamados fotobiorreactores cerrados, utilizando CO₂ enriquecido y otros nutrientes vitales necesarios. El CO₂ puede venir en forma de gases de combustión o gases de efecto invernadero de plantas de energía u obtenerse de otro proceso de combustión de combustibles fósiles o de procesos biológicos como las plantas de biogás. Las microalgas heterotróficas se cultivan en fermentadores cerrados usando azúcar o almidón, similar a la fermentación de etanol de maíz y caña de azúcar o remolacha, los cuales ya proporcionan casi el 5 % – 20 % de los combustibles líquidos para el transporte a nivel mundial (Miao & Wu, 2006).

En 1992 se encontró que *Chlorella* es tolerante a concentraciones de CO₂ de hasta 40 % en volumen (Hanagata, Takeuchi, Fukuju, Barnes, & Karube, 1992) y en 1999 se informó que *Chlorella* creció en condiciones de hasta 40 °C (Sung, Lee, Shin, & Choi, 1999). En el año 2006, un grupo de investigadores demostraron que se puede utilizar una especie de *Chlorella* (*Protothecoides de Chlorella*) para producir biodiesel que cumpla con los estándares de ASTM. Las microalgas se cultivaron heterotróficamente para aumentar el contenido de aceite del 14,6 % en base seca al 55,2 % en base seca y se usó la transesterificación ácida ya que el valor ácido para el aceite de algas se informó como 8,97 mg de KOH/g (Miao & Wu, 2006). El rendimiento del biodiésel fue aproximadamente del 70 % a 50 °C y

condiciones del catalizador de H_2SO_4 al 60 %, tiempo de reacción de 5 h, velocidad de agitación de 160 min^{-1} , 9,12 g de aceite de microalgas y una relación 30:1 de metanol a aceite (Miao & Wu, 2006). Las tecnologías de producción de algas en sus fases de crecimiento y subdesarrollo son albergadas desde estanques abiertos a fotobiorreactores cerrados y complejos. En la Figura 1 se muestran algunos tipos de biorreactores utilizados para la producción de algas.

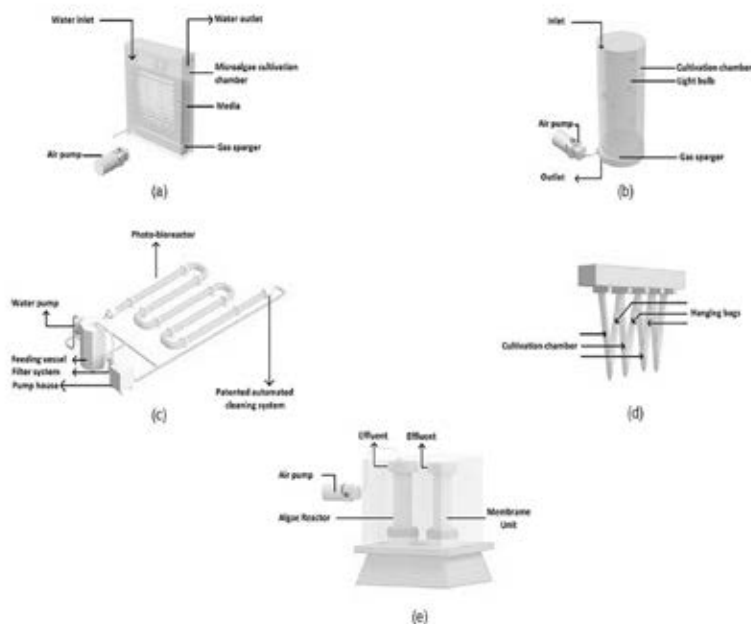


Figura 1. Diseños comunes de biorreactores para la producción de algas: (a) placas planas, (b) columnas, (c) tubular, (d) colgante y (e) híbrido (Vo et al., 2019)

2.3.3 Extracción

Los lípidos de las algas se encuentran dentro de la célula, la excepción es *Botryococcus braunii*, que secreta los lípidos a través de la pared celular, pero tiene una baja productividad. Los lípidos no pueden recuperarse efectivamente de las algas utilizando métodos diseñados para la extrusión de aceite de cultivos como la soja, debido al pequeño tamaño de las algas y la resistencia mecánica de sus paredes. La ubicación intracelular de los lípidos requiere que las algas se cosechen de forma económica y que el aceite se recupere por la rotura de la pared celular de las algas. Los métodos de separación típicos como la centrifugación, la filtración y la floculación química son caros o introducen Al^{3+} como contaminante (Lee & Lee, 2016). Una revisión reciente de los métodos de extracción indica que los métodos mecánicos son óptimos, pero estos tienen un alto consumo de energía

específico, que excede el contenido de energía disponible del lípido extraído (Lee & Lee, 2016). Existen diversos métodos para llevar a cabo la extracción de los aceites tales como: extracción simple, extracción con CO₂ supercrítico, extracción por ultrasonido y electroporación.

2.3.4 Futuras tendencias

El precio de producción estimado actual del biodiesel no fomenta su adopción sobre el combustible a partir del petróleo. La ausencia de políticas gubernamentales claras es una causa principal de la pobre industria del biodiesel. Por lo tanto, los gobiernos deberían crear y expandir políticas para ayudar a la comercialización de biodiesel mediante el apoyo financiero directo o indirecto, como créditos fiscales y subsidios. Por otro lado, todavía hay espacio para una posible reducción en el costo de la producción de biodiesel. Específicamente, la mayoría de las investigaciones se han centrado en el crecimiento de algas, pero se debe prestar más atención al aumento del contenido de lípidos debido a su potencial para aumentar los rendimientos de producción de biocombustibles. Además, la utilización de residuos de algas para la producción de biogás puede mejorar los beneficios económicos de este proceso.

Los biocombustibles se producen actualmente a partir de carbohidratos y lípidos en la materia prima. Las proteínas, por el contrario, no se han utilizado para sintetizar combustibles debido a las dificultades de desaminar los hidrolizados de proteínas. El uso de proteínas recombinantes también podría usarse para producir enzimas de producción de biocombustibles a gran escala. En 2011, se desarrolló un método para generar *Escherichia coli* que puede desaminar los hidrolizados de proteínas, lo que permite a las células convertir proteínas en alcoholes C4 y C5 con un 56 % del rendimiento teórico (Huo, Rivera, Monte, & Liao, 2011).

3. Conclusiones

El biocombustible desempeñará un papel importante para satisfacer las necesidades energéticas del mundo en el futuro. En este documento, se revisaron las cuatro generaciones de biocombustibles líquidos en términos de sus materias primas, tecnologías de producción de los biocombustibles de tercera generación, en específico de una de las etapas cruciales como lo es la extracción del aceite de algas e influencias ambientales. Cada generación tiene ventajas y limitaciones. Para reducir el uso creciente de combustibles derivados del petróleo, se necesita un suministro renovable de materia prima. Varios parámetros afectan la disponibilidad y producción de materia prima para biocombustibles, como la ubicación geográfica, la condición económica de la población y las demandas de combustible versus la demanda alimentaria. Los biocombustibles de primera generación no pueden

reemplazar a los combustibles fósiles debido a la competencia con las necesidades alimentarias. En contraste, los biocombustibles de tercera y cuarta generación son opciones más prometedoras porque no involucran tal competencia de combustible alimentario. Otro parámetro valioso para asegurar la sostenibilidad de los biocombustibles líquidos son los avances tecnológicos. Se requieren mejoras en la rentabilidad y en los sistemas de conversión para la producción comercial generalizada de biocombustibles. Este objetivo probablemente se logrará utilizando herramientas de ingeniería metabólica que mejoren los biocombustibles tanto cuantitativa como cualitativamente modificando las vías biológicas existentes. Esto tiene el potencial de alterar la materia prima o identificar microbios de mayor utilidad para obtener mejores tasas de conversión. Se necesitan más investigaciones para lograr mayores rendimientos y procesos de producción más rentables. Para la reducción de gases de efecto invernadero, los biocombustibles de segunda y tercera generación han mostrado un rendimiento mucho mejor en comparación con los biocombustibles de primera generación. Se espera una mayor reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero de los biocombustibles de cuarta generación. Actualmente, los biocombustibles líquidos de primera generación se consideran los más rentables. Sin embargo, la producción se limita a ciertos países debido a la alta demanda de tierra y agua. Los biocombustibles líquidos de segunda y tercera generación todavía tienen limitaciones en los costos de producción debido a los altos costos de inversión y la baja eficiencia de la conversión de materias primas a biocombustibles. Un mayor desarrollo y la perfección de las tecnologías de producción de bioetanol y biodiésel de segunda y tercera generación pueden mejorar su rentabilidad. En general, el futuro del biocombustible líquido puede ser una integración de algunas o todas las cuatro generaciones.

4. Referencias

- Askew, M. F. (2003). Progress in renewable energy. *International Sugar Journal*, 105(1259), 535–539.
- Atabani, A., Silitonga, A., Badruddin, I., Mahlia, T., Masjuki, H., & Mekhilef, S. (2012). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2070–2093.
- Carere, C., Sparling, R., Cicek, N., & Levin, D. (2008). Third generation biofuels via direct cellulose fermentation. *International Journal of Molecular Sciences*, 9, 1342–1360.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25, 294–306.
- Fazal, T., Mushtaq, A., Rehman, F., Ullah Khan, A., Rashid, N., Farooq, W., ...

- Xu, J. (2018). Bioremediation of textile wastewater and successive biodiesel production using microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 3107–3126.
- Galazca, J., Tian, C., & Beeson, W. (2010). Cellodextrin transport in yeast for improved biofuel production. *Science*, *330*(6000), 84–86.
- Hallmann, A. (2015). Algae biotechnology – green cell-factories on the rise. *Current Biotechnology*, *4*(4), 389–415.
- Hanagata, N., Takeuchi, T., Fukuju, Y., Barnes, D., & Karube, I. (1992). Tolerance of microalgae to high CO₂ and high temperature. *Phytochemistry*, *31*(10), 3345–3348.
- Hu, Q., Sommerfield, M., Jarvis, E., & Ghirardi, M. (2008). Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *The Plant Journal*, *54*, 621–639.
- Huo, Y., Rivera, J., Monte, E., & Liao, J. (2011). Conversion of proteins into biofuels by engineering nitrogen flux. *Nature Biotechnology*, *29*(4), 346–351.
- Lam, M., & Lee, K. (2011). Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME): win–win strategies toward better environmental protection. *Biotechnology Advances*, *29*, 124–141.
- Lam, M., & Lee, K. (2012). Microalgae biofuels: a critical review of issues, problems and the way forward. *Biotechnology Advances*, *30*(3), 673–690.
- Lee, O., & Lee, E. (2016). Sustainable production of bioethanol from renewable brown algae biomass. *Biomass and Bioenergy*, *92*, 70–75.
- Los, D., & Mironov, K. (2015). Modes of fatty acid desaturation in cyanobacteria: an update. *Life*, *5*, 554–567.
- Miao, X., & Wu, Q. (2006). Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. *Bioresource Technology*, *97*, 841–846.
- Peralta, Y., Zhang, F., del Cardayre, S., & Keasling, J. (2012). Microbial engineering for the production of advanced biofuels. *Nature*, *488*, 320–328.
- Pinto, A., Guarieiro, L., & Razende, M. (2005). Biodiesel: an overview. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, *16*(6), 1313–1330.
- Quintana, N., van der Krooy, F., van de Rhee, M., Voshol, G., & Verpoorte, R. (2011). Renewable energy from cyanobacteria: energy production optimization by metabolic pathway engineering. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *91*, 471–490.

- Rasala, B., Muto, M., Lee, P., & Jager, M. (2010). Production of therapeutic proteins in algae, analysis of expression of seven human proteins in the chloroplast of *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Biotechnology Journal*, 8, 719–733.
- Rizza, L., Smachetti, M., Nascimento, M., Salerno, G., & Curatti, L. (2017). Bioprospecting for native microalgae as an alternative source of sugars for the production of bioethanol. *Algal Research*, 22, 140–147.
- Ruffing, A., & Jones, H. (2012). Physiological effects of free fatty acid production in genetically engineered *Synechococcus elongatus* PCC 7942. *Biotechnology and Bioengineering*, 109, 2190–2199.
- Sarsekeyeva, F., Zayadan, B., Usserbaeva, A., Bedbenov, V., & Sinetova, M. (2015). Cyanofuels: biofuels from cyanobacteria. Reality and perspectives. *Photosynthesis Research*, 125, 329–340.
- Shahid, E., & Jamal, Y. (2011). Production of biodiesel: a technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4732–4745.
- Sung, K., Lee, J., Shin, C., & Choi, M. (1999). CO₂ fixation by *Chlorella* sp. KR-1 and its cultural characteristics. *Bioresource Technology*, 68, 269–273.
- Tan, I., & Lee, K. (2016). Comparison of different process strategies for bioethanol production from *Eucheuma cottonii*: an economic study. *Bioresource Technology*, 199, 336–346.
- Tsukahara, K., & Sawayama, S. (2005). Liquid fuel production using microalgae. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 48(5), 251–259.
- Vo, H. N. P., Ngo, H. H., Guo, W., Nguyen, T. M. H., Liu, Y., Liu, Y., ... Chang, S. W. (2019). A critical review on designs and applications of microalgae-based photobioreactors for pollutants treatment. *Science of the Total Environment*, 651, 1549–1568.
- Zhang, A., Luo, J., & Zhang, T. (2009). Recent advances on the GAP promoter derived expression system of *Pichia pastoris*. *Molecular Biology Reports*, 36, 1611–1619.

