

## Obtención de biodiesel asistida por ultrasonidos a partir de aceites de *Jatropha curcas* y *Moringa oleífera*

### Obtaining of biodiesel from *Jatropha curcas* and *Moringa oleífera* oils assisted by ultrasounds

Adriana García Abreu<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (Cujae). Calle 114 No 11901 entre 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba.

\*Correspondencia: [renia@tesla.cujae.edu.cu](mailto:renia@tesla.cujae.edu.cu)

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



#### Resumen

El transporte en Cuba es uno de los sectores de mayor dependencia de importaciones de combustibles fósiles, específicamente de combustible diesel. Por esta razón, se hace necesario el uso de fuentes alternativas de energía, que sean renovables y amigables con el medio ambiente. En este sentido el biodiesel se ha convertido en el biocombustible sustituto al diesel. En el presente trabajo se actualizó el estado del arte en el proceso de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales, haciendo énfasis en el contexto cubano. La *Jatropha curcas* y la *Moringa oleífera* se identificaron como las especies oleaginosas con mayor potencial para la obtención del portador energético renovable. En cuanto a la síntesis del biodiesel, la catálisis básica homogénea resultó la vía más factible para la producción a nivel local. Sin embargo, cuando se aplica este método se requiere un contenido de ácidos grasos libres en la materia prima (aceite vegetal) inferior al 1%. De esta manera, se corroboró la necesidad de realizar una esterificación previa como pretratamiento. Con esta etapa se garantiza la eficiencia de la producción del biodiesel, pero se incrementa el consumo de energía, reactivos y el tiempo de duración del mismo. A partir de reportes de la literatura, se identificó la tecnología ultrasónica como una de las alternativas actuales más efectivas para la reducción de los tiempos de reacción y consumo energético en el proceso de producción de biodiesel.

**Palabras clave:** *Jatropha curcas*, *Moringa oleífera*, biodiesel, ultrasonidos

#### Abstract

Transportation in Cuba is one of the most dependent sectors on fossil fuels imports, mainly diesel fuel. For this reason, it is necessary to use alternative sources of energy, which are renewable and environmentally friendly. In this context, biodiesel has become the substitute biofuel for diesel engines. In the present work, the state of art in biodiesel production from vegetable oils was updated, mainly focused in the Cuban context. *Jatropha curcas* and *Moringa oleífera* were identified as the oleaginous species with the greatest potential for obtaining the renewable energy. Regarding the synthesis of biodiesel, homogeneous basic catalysis was the most feasible way for production of it at local level. However, when this method is applied, free fatty acids content lower than 1% in raw materials (vegetable oils) is required. Thus, the need to carry out a previous esterification as a pretreatment was identified and corroborated. The efficiency of biodiesel production is assured with this step stage, but energy consumption, chemical reagents consumption and the duration of the process are increased.

Based on literature reports, the ultrasonic technology was identified as one of the most effective current alternatives to reducing reaction times and energy consumption.

**Keywords:** *Jatropha curcas*, *Moringa oleifera*, biodiesel, ultrasounds

## 1. Introducción

El petróleo como combustible desempeña un papel vital en el desarrollo industrial, en el transporte y la agricultura, permitiendo resolver muchas de las necesidades energéticas básicas del ser humano. Sin embargo, la demanda de energía en el mundo se incrementa rápidamente provocando un excesivo uso de este tipo de combustible. Por esta razón, ha aumentado el precio en el mercado internacional de dicho portador energético, debido a su carácter no renovable [1]. Uno de los grandes retos que han de abordar los países en los próximos años, en función de las actuales tendencias de una sociedad más sostenible, lo constituyen las grandes transformaciones que se experimentan en el ámbito energético y ambiental [2]. Entre las medidas que están siendo consideradas figuran el uso de combustibles alternativos, sistemas ampliados de transporte masivo y una mejor planificación urbana. También se toma como medida la intensificación de la utilización de fuentes alternativas de energía y la eficiencia energética; esta última es uno de los elementos de gran importancia. Con la aplicación de medidas eficientes como estas, sobre los portadores energéticos, tanto en el área de los servicios como en las esferas productivas, no solo se pueden ahorrar estos recursos, sino que además, se mejoran las condiciones medioambientales y se reducen los costos por este concepto [2].

En el contexto cubano el sector del transporte es uno de los altos consumidores de combustible diesel, generando al país gastos excesivos en importaciones y serios problemas de contaminación ambiental. En este sentido, el biodiesel surge como combustible alternativo al diesel. El biodiesel es una fuente de energía limpia, renovable, de calidad y económicamente viable, que además contribuye a la conservación del medio ambiente. Este es un biocombustible líquido que se obtiene por transformación de triglicéridos mediante los procesos de esterificación y transesterificación. El mismo está formado por ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga y corta; derivados de lípidos como aceites vegetales, grasas animales, algas, etc., y se utiliza en motores de combustión interna tipo diesel.

En Cuba existen plantas oleaginosas con potencial para producir biodiesel. Tal es el caso del cultivo de *Moringa oleífera* y la *Jatropha curcas*, también llamada Piñón botija. Las semillas de ambas especies tienen un alto contenido de aceite [3-10].

La producción de biodiesel se desarrolla a través de la transesterificación. En dicha reacción se emplean catalizadores homogéneos (ácidos o bases), siendo los últimos más usados a nivel local. Generalmente se utilizan catalizadores alcalinos homogéneos, especialmente hidróxido de sodio y de potasio porque proporcionan mayor velocidad de reacción que cuando están presentes los catalizadores ácidos [11]. En estos procesos se requiere garantizar previo a la transesterificación, un contenido de ácidos grasos libres en la materia prima inferior al 1%. Con este objetivo se realiza un pretratamiento de esterificación. La reacción demanda tiempos superiores a dos horas, consumo de reactivos y energía. A partir de lo antes expuesto se define como objetivo de este trabajo identificar una vía efectiva para disminuir el tiempo de reacción y el consumo energético de la obtención de biodiesel a partir de los aceites de *Moringa oleífera* y *Jatropha curcas*.

## 2. Desarrollo

A lo largo de la historia, el desarrollo de los biocombustibles ha estado dado por la crisis de los recursos petrolíferos a nivel mundial. Su utilización comienza a finales del siglo XIX principalmente como fuente de energía. El ingeniero alemán Rudolph Diesel inicia la producción de combustibles a partir de aceites de origen vegetal. Posteriormente, debido a la escasez de combustibles fósiles durante la segunda guerra mundial, se investiga sobre el diesel de origen vegetal, pero no fue hasta la década de los 70 que, debido a la crisis energética, se produjo biodiesel de forma significativa para suplir las necesidades del mercado. El biodiesel ha recibido mucha atención en las últimas décadas debido a su importancia ambiental. El mismo es biodegradable, produce menos efectos negativos que el diesel derivado del petróleo (ya que proviene de una fuente renovable) y produce escasas emisiones de gases corrosivos y de aquellos que provocan el efecto invernadero. Actualmente, la producción comercial de biodiesel se ha incrementado y se espera que en los próximos años sustituya parcial pero significativamente la utilización del diesel derivado del petróleo [12]. Los combustibles alternativos se convierten así en una de las soluciones al problema que representaba el agotamiento de los recursos no renovables.

### *Propiedades*

El biodiesel es el único combustible alternativo que puede utilizarse directamente en cualquier motor diesel, sin que sea necesaria ninguna modificación. Sin embargo, para que el mismo se pueda emplear como combustible de automoción, la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) ha establecido los límites en las propiedades del biodiesel que garanticen la calidad del producto y el correcto funcionamiento en los motores [5]. Desde el punto de vista de la inflamabilidad y toxicidad, es más seguro que el combustible diesel y no es peligroso para el ambiente. Dicho portador energético renovable puede ser usado puro o mezclado con combustible diesel. El biodiesel tiene una correlación con el desarrollo sostenible, conservación de la energía, la eficiencia y la preservación del medio ambiente. Este ha contribuido a disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, es de alta calidad para los motores diesel y disminuye las emisiones contaminantes [3].

El biodiesel se clasifica teniendo en cuenta la procedencia de la materia prima en primera, segunda, tercera o cuarta generación. Así por ejemplo, el biodiesel de primera generación se obtiene a partir de biomasa procedente de cultivos ligados a la alimentación. La tecnología a escala comercial está establecida y continuamente se mejora su eficiencia de producción. Sin embargo, el alto costo de este tipo de materia prima es una barrera crítica para su desarrollo [13].

Existen varias materias primas que se usan para la producción de biodiesel, entre ellas se pueden citar aceites de origen vegetal como Soya, Girasol, Colza, Coco y Palma; también hay procesos de producción que utilizan aceites de fritura usados o grasas animales como sebo de vaca, sebo de búfalo y grasas de pollo o pescado [4]. Cualquier materia que contenga triglicéridos puede emplearse para la producción de biodiesel; un ejemplo resultan, los destilados de ácidos grasos procedentes del proceso de refinación de aceites vegetales y las algas. La selección adecuada de la materia prima depende principalmente de la disponibilidad existente en la región donde se construya la planta de producción del portador energético.

Actualmente en Cuba se desarrolla el proyecto: "Bioenergía, Tecnologías limpias para el desarrollo rural", cuyo objetivo principal es incrementar el acceso a la bioenergía mediante la promoción del uso de tecnologías de biodiesel y biogás por agricultores, lo que disminuye el consumo de combustible diesel necesario para satisfacer la demanda energética local. Esta estrategia se ha implementado en varios

municipios del país promoviendo el uso de fuentes renovables de energías, el tratamiento y aprovechamiento de residuales, así como la reducción de gases de efecto invernadero. Para obtener biodiesel se utilizan la *Moringa oleífera* y la *Jatropha curcas*. Ambas oleaginosas están disponibles en varias provincias del país [3, 14].

La moringa es el único género de la familia *Moringaceae*, un grupo pequeño de plantas dentro del orden *Brassicales*. Este género comprende 13 especies que abarcan una gama muy diversa de hábitos o formas de crecimiento, desde hierbas y arbustos hasta árboles grandes. La moringa es de crecimiento rápido y en algunos casos puede sobrepasar los 10 metros de altura. De ella se aprovecha prácticamente todo. Posee un alto contenido de proteínas, demanda poco cuidado agrícola y bajo costo de producción. Es de clima tropical y subtropical, admite muy bien las podas y es no tóxico. Es un árbol perenne, pero poco longevo, que puede vivir 20 años. Entre todas las especies de moringa, la más popular, es la *Moringa oleífera*, árbol original de la India. Se desarrolla a diferentes temperaturas a la sombra, las mínimas y máximas varían desde -1 a 3 °C hasta 38 a 48 °C, durante los meses más fríos y los más calientes, respectivamente. El aceite es de color amarillo, claro, poco viscoso, dulce, sin olor y rico en antioxidantes, lo que lo hace adecuado tanto para la piel, como para el cuidado del cabello. El grano contiene entre 30 y 41% de su peso en aceite, rico en ácidos grasos monoinsaturados o poliinsaturados, lo que la convierte en un importante recurso para obtener biodiesel de calidad.

Las propiedades de la *Jatropha curcas* han motivado la atención de varias instituciones, ya que se adapta muy bien en áreas marginales semiáridas, es altamente resistente a la sequía y su aceite puede ser procesado para su uso como sustituto del diesel (biodiesel) o como materia prima para la industria. Es originaria de México y Centroamérica, pero crece en la mayoría de los países tropicales. En Cuba, está presente en casi todas las provincias y el municipio especial de la Isla de la Juventud. Se disemina de forma silvestre como cerca viva, y especialmente en Guantánamo y Granma se desarrollan los primeros cultivos energéticos impulsados por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba (CITMA), el Ministerio del Azúcar (MINAZ) y el apoyo del Ministerio de la Industria Básica (MINBAS). La planta *Jatropha curcas* pertenece a la familia de las *Euphorbeaceae* (familia Castor). Es una oleaginosa de porte arbustivo que tiene más de 3 500 especies agrupadas en 210 géneros; alcanza de 3 a 6 m de altura y tiene una longevidad mayor de cincuenta años; se destaca por su producción de biomasa, versatilidad de usos y adaptabilidad a condiciones marginales [15]. También se reporta que el contenido de fibra, proteína y minerales (P, Ca, Mg, Na y K) de sus frutos es de importancia como fertilizante y para un uso eventual en la nutrición animal. Dicha especie contiene un volumen de aceite de 35 a 40% en las semillas y entre 50 y 60% en el grano [16]. Se distribuye mayormente en los trópicos y los subtrópicos. Se adapta normalmente al calor, aunque también soporta bajas temperaturas y puede resistir hasta una escarcha ligera. Se encuentra generalmente a bajas elevaciones y temperaturas de 18 a 28 °C; aunque se siembra también en sitios con temperaturas de hasta 34 °C y no requiere de un tipo de suelo especial. Su demanda de agua es baja y puede soportar períodos largos de sequía. En las Figuras 1 y 2 se muestran partes de ambos arboles objetos de estudio.

La transesterificación consiste en una secuencia de tres reacciones reversibles consecutivas, en la que se esterifica cada uno de los ácidos grasos unidos a la glicerina. El primer paso es la conversión de triglicéridos a diglicéridos, seguido por la conversión de diglicéridos a monoglicéridos y finalmente, monoglicéridos a glicerina, produciendo una molécula de éster por cada glicérido en cada paso. Los productos en mayor proporción son los ésteres de ácidos grasos (biodiesel) y la glicerina.



**Fig.1** Planta, hojas y semillas de *Moringa oleifera*



**Fig.3** Planta, hojas y semillas de *Jatropha curcas*

### *Ultrasonidos*

El método de agitación asistida por ultrasonidos presenta ventajas tales como tiempos de reacción más cortos y menos consumo de energía. Estas ventajas se deben a que el ultrasonido favorece la transferencia de masa de sistemas heterogéneos líquido-líquido. Con el aumento de la transferencia de masa líquido-líquido, los aceites y el metanol se mezclan fácilmente entre sí. Bajo irradiación ultrasónica, la transesterificación puede llevarse a cabo a bajas temperaturas (ahorro en la energía necesaria para el calentamiento de las corrientes de proceso), y se necesitan cantidades menores de catalizador y alcohol [17, 18]. Por estas razones podría ser utilizado el método ultrasónico como una técnica más eficiente y económica de obtener biodiesel.

El ultrasonido, al igual que cualquier onda sonora, comprime y estira alternativamente la separación molecular del medio a través del cual pasa, provocando una serie de ciclos de compresión y rarefacción. Si se aplica un gradiente de presión negativo grande al líquido de modo que la distancia entre las moléculas exceda la distancia molecular crítica necesaria para mantener intacto el líquido, su estructura se romperá, se crearán vacíos (cavidades) y se formarán burbujas de cavitación [19]. Estas proporcionan una mezcla intensa y mejoran considerablemente la velocidad de la reacción, pues aumentan la agitación y calefacción, debido a la formación y colapso de una gran cantidad de microburbujas. Las mismas generan altas temperaturas y presiones locales, con lo que aumenta la interacción entre fases, mejorando la transferencia de materia y la velocidad de reacción [20, 21].

A altas intensidades ultrasónicas, una pequeña cavidad puede crecer rápidamente a través de efectos inerciales, por lo tanto, algunas burbujas sufren una expansión repentina a un tamaño inestable y colapsan violentamente, generando energía para efectos químicos y mecánicos. El colapso de las burbujas de cavitación interrumpe el límite de fase y provoca la emulsificación. Una irradiación ultrasónica de baja frecuencia podría ser útil para la transesterificación de triglicéridos con alcohol. La ultrasonificación proporciona la energía mecánica para la mezcla y la energía de activación requerida para iniciar la reacción de transesterificación. La ultrasonografía aumenta la velocidad de reacción química y el rendimiento de la transesterificación de aceites vegetales y las grasas animales en el biodiesel. Debido a las ventajas del método ultrasónico en cuanto a tiempos de reacción más cortos, menos consumo de reactivos y energía, entonces existe la posibilidad de construir plantas químicas menos costosas y más pequeñas.

El ultrasonido se define por su intensidad ( $\text{Watt/cm}^2$ ) así como por su frecuencia (kHz). Una frecuencia más alta hace que la sonda de ultrasonido vibre más rápido, lo que resulta en una mayor superficie para mezclar el alcohol, triglicéridos y una pequeña cavitación [22]. Los métodos empleados con el uso del ultrasonido son la irradiación mediante sonda o mediante baño de ultrasonido. En el primero, se acelera mucho más la reacción. Consiste en introducir una sonda generadora de ultrasonido directamente dentro de la mezcla de reacción. En el método de baño de ultrasonido, el reactor está sumergido en un baño al que se le aplican las ondas ultrasónicas, lo que hace que no se llegue a los niveles de aceleración de la sonda, pero se alcancen valores aceptables [23].

Actualmente existen varios reportes que demuestran la efectividad que tiene la utilización de ultrasonido como medio de agitación en la eficiencia de la reacción de transesterificación [24-26], obtienen rendimientos entre 86,38% y 97% para la síntesis de biodiesel asistida por ultrasonidos (irradiación por sondas). En estas investigaciones se utilizan aceites vegetales como materia prima. En todos los casos el tiempo de reacción reportado es inferior a 30 minutos. Santos et al. [27], optimizan el proceso de obtención de biodiesel a partir de aceite de soya empleando un baño ultrasónico. Los resultados óptimos de la relación molar alcohol aceite, la concentración de catalizador y el tiempo de reacción fueron, 9:1, 0,2% de hidróxido de sodio y 30 minutos respectivamente. Igualmente, Mahamuni et al. [28], obtienen parámetros optimizados para la síntesis de biodiesel a partir de aceite de soya. Los experimentos se realizan en un reactor ultrasónico multifrecuencia. En este caso se alcanza un rendimiento superior a 90% empleando una relación molar 6:1, 0,5 % de hidróxido de potasio como catalizador y un tiempo de 30 minutos.

Teniendo en cuenta lo expuesto en este acápite, la tecnología ultrasónica constituye una alternativa atractiva utilizada con éxito en la transesterificación de aceites vegetales. A partir de este antecedente, pudiera emplearse también en la etapa de esterificación de los aceites vegetales pues hasta el momento dicha reacción tiene una duración mínima de 1,5 h. La reducción del tiempo de la reacción de esterificación permitiría obtener el producto final en un menor tiempo.

### 3. Conclusiones

La *Moringa oleífera* y la *Jatropha curcas* son oleaginosas diseminadas en Cuba que se consideran cultivos potenciales para la producción de biodiesel, el cual constituye una alternativa energética adecuada para sustituir al combustible diesel en vehículos, disminuir las importaciones y la contaminación al medio ambiente. La catálisis básica homogénea es uno de los métodos más factibles para aplicar el concepto de producción de biocombustibles a nivel local debido a lo simple de la técnica utilizada. Sin embargo, el contenido de ácidos grasos libres del aceite que se usa como materia prima del

proceso debe ser inferior al 1%. La esterificación se realiza como pretratamiento previo a la síntesis de biodiesel con el objetivo de disminuir el contenido de ácidos grasos libres. Esta es una etapa intermedia indispensable para garantizar la eficiencia y eficacia del proceso, pero incrementa el consumo de energía, reactivos y el tiempo de duración del mismo. El método de agitación ultrasónica constituye la técnica más eficiente y económica para la obtención de biodiesel, pues permite realizar la síntesis del mismo en tiempos de reacción más cortos y menor consumo de energía.

## Referencias

1. García, A., Cabrera, R., *Esterificación del aceite de Moringa oleífera asistida por ultrasonido*, 2019. Tesis de Diploma. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE. La Habana, Cuba.
2. Pérez, A., *Transesterificación del aceite de Moringa oleífera asistida por ultrasonido*, 2018. Tesis de Diploma. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica de La Habana, CUJAE. La Habana, Cuba.
3. Alonso, O., *Biodiesel obtenido a partir del aceite de Moringa oleífera*, 2017. Tesis de Diploma. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica de La Habana, CUJAE. La Habana, Cuba.
4. Pedroso, H., *Biodiesel obtenido a partir del aceite de Moringa oleífera*, 2016. Tesis de Diploma. Facultad de Ingeniería Química, 2016. Universidad Tecnológica de La Habana, CUJAE.
5. Colectivo de Autores, *Biocombustibles para su uso en motores diesel*, 2014. IDICT: La Habana. ISBN: 978-959-234-095-4. 2014.
6. Piloto-Rodríguez, R., Goyos, L., Alfonso, M., Duarte, M., Caro, R., Galle, J., Sierens, R., Verhelst, S., *Thermal behavior of Jatropha curcas oils and their derived fatty acid ethyl esters as potential feedstocks for energy production in Cuba*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2011. **109**(2): p. 1005-1012.
7. Piloto-Rodríguez, R., Tobío, I., Ortiz-Alvarez, M., Díaz, Y., Konradi, S., Pohl, S., *An approach to the use of Jatropha curcas by-products as energy source in agroindustry*. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2020. p. 1-21.
8. Díaz, Y., Tabio, D., Goyos, L., Fernández, E., Rondón, M., Fischer, T., Piloto-Rodríguez, R., *Rheological behavior and properties of biodiesel and vegetable oil from Moringa oleífera Lam*. Afinidad, 2019. **76**(587): p. 83-90.
9. Díaz, Y., Tabio, D., Goyos-Pérez, L., Fernández, E., Piloto-Rodríguez, R., *Extraction and characterization of oil from Moringa oleífera for energy purposes*. Wulfenia, **24**(5): p. 86-103.
10. Pfeil, M., Tobío-Pérez, I., Denfeld, D., Díaz, Y., Pohl, S., Piloto-Rodríguez, R., *Characterization and assessment of Jatropha curcas and Moringa oleífera husk and their potential use in gasification*. Energy, Ecology and Environment, 2021. **6**(2): p. 170-182.
11. Medina, M., Ospino, Y., Tejeda, L., *Esterificación y transesterificación de aceites residuales para obtener biodiesel*. Revista Luna Azul, 2015: p. 25-34.
12. Molina, C., *Estudio de la composición y estabilidad de biodiesel obtenido a partir de aceites vegetales limpios y procedentes de aceites de fritura*, 2011. Tesis de Doctorado. Universidad de La Laguna.
13. Barros, X., *Obtención de biodiesel a partir del aceite de cocina usado en la ENM*. Tesis de Diploma, 2015. Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar. Vigo, España.
14. Díaz, Y., *Producción y caracterización de biodiesel de Moringa oleífera*. Tesis de Doctorado, 2019. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE. La Habana.

15. Sotolongo, J., *Potencialidades energéticas y medioambientales del árbol Jatropha curcas l en las condiciones edafoclimáticas de la región semiárida de la provincia de Guantánamo*. Tecnología Química, 2007. **2**: p. 76-82.
16. Toral, O., Iglesias, J.M., Montes de Oca, S., Sotolongo, J.A., García, S., Torsti, M., *Jatropha curcas L., a tree species with energetic potential in Cuba*. Pastos y Forrajes, 2008. **31**: p. 191-207.
17. Kafuku, G., Lam, M.K., *Heterogeneous catalyzed biodiesel production from Moringa oleifera oil*. Fuel Processing Technology, 2010. **91**(11): p. 1525-1529.
18. He, B., Van, J., *Application of ultrasonication in transesterification processes for biodiesel production*. Future Science, 2012. **3**(4): p. 479-488.
19. Pal, A., Kachhwaha, S., *Biodiesel production of waste cooking oil through ultrasound cavitation*. International Journal of Engineering Research and Technology, 2013. **6**(3): p. 291-306.
20. Gharat, N., Rathod, V., *Ultrasound assisted enzyme catalyzed transesterification of waste cooking oil with dimethyl carbonate*. Ultrasonics sonochemistry, 2013. **20**(3): p. 900-905.
21. Sebayang, D., Agustian, E., Praptijanto, A., *Transesterification of biodiesel from waste cooking oil using ultrasonic technique*. International Conference on Environment, 2010. Malaysia.
22. Basiri, M., Rahimi, M., Babae, M., *Ultrasound-assisted biodiesel production in micro reactors*. Iranian Journal of Chemical Engineering, 2016. **13**(2): p. 22-32.
23. Demirbas, A., *Biodiesel production from non-edible plant oils*. Energy Exploration & Exploitation, 2016. **34**(2): p. 290-318.
24. Hoseini, S., et al., *Ailanthus altissima (tree of heaven) seed oil: Characterisation and optimisation of ultrasonication-assisted biodiesel production*. Fuel, 2018. **220**: p. 621-630.
25. Koutsouki, A., et al., *In situ transesterification of Cynara cardunculus L. seed oil via direct ultrasonication for the production of biodiesel*. Fuel Processing Technology, 2015. **134**: p. 122-129.
26. Mahlinda, S., et al., *A comparative study of biodiesel production from screw pine fruit seed: using ultrasound and microwave assistance in in-situ transesterification*. Journal of Engineering Science and Technology, 2017. **12**(12): p. 3412-3425.
27. Santos, F., Rodrigues, S., Fernandes, F., *Optimization of the production of biodiesel from soybean oil by ultrasound assisted methanolysis*. Fuel processing technology, 2009. **90**(2): p. 312-316.
28. Mahamuni, N., Adewuyi, Y., *Optimization of the synthesis of biodiesel via ultrasound-enhanced base-catalyzed transesterification of soybean oil using a multifrequency ultrasonic reactor*. Energy & Fuels, 2009. **23**(5): p. 2757-2766.