

Ensayo expositivo

Lipasas: una alternativa para el uso y la biorremediación de aceites residuales de cocina

Lipases: an alternative for the use and bioremediation of used cooking oils

Miguel Ángel Canseco Pérez^{1,2*}, Yolanda del Carmen Pérez Luna²,
Roberto Berrones Hernández², Yazmin Sánchez Roque²

¹Posdoctoral CONAHCYT

²Universidad Politécnica de Chiapas

Autor de correspondencia:

*mcanseco@ia.upchiapas.edu.mx

Recibido: 13-11-2023 Aceptado: 05-12-2025 (Artículo Arbitrado)

Resumen

Los aceites de cocina usados son un subproducto generado de los procesos de preparación de alimentos en todo el mundo, en su mayoría están constituidos por aceites vegetales que fueron sometidos a temperaturas elevadas, causando termo-degradación y un cambio en sus propiedades fisicoquímicas, favoreciendo la formación de algunos compuestos tóxicos. Su elevada producción y su disposición incorrecta representan un problema ambiental y de salud pública importante. Por lo que se deben buscar alternativas, ya sea para su eliminación o su reintroducción de manera segura en las cadenas de valor. El presente trabajo aborda parte de la problemática de los aceites de cocina usados y de cómo el uso de enzimas llamadas lipasas pueden coadyuvar a la valorización de este producto o a la mitigación del impacto ambiental cuando es vertido en los sistemas de drenaje.

Palabras clave: Biodiésel, Contaminación, Impacto ambiental, Transesterificación.

Abstract

Used cooking oils are a by-product generated from food preparation processes all over the world, mostly made up of vegetable oils that have been subjected to high temperatures, causing thermo-degradation and a change in their physicochemical properties, favoring the formation of some toxic compounds. Their high production and improper disposal represent a major environmental and public health problem. Therefore, alternatives must be sought, either for their elimination or their safe reintroduction into the value chains. This work addresses part of the problem of used cooking oils and how the use of enzymes called lipases can contribute to the valorization of this product or to the mitigation of the environmental impact when it is dumped in drainage systems.

Keywords: Biodiesel, Pollution, Environmental impact, Transesterification.

Introducción

El rápido crecimiento poblacional, los procesos migratorios y la globalización, han permitido la internacionalización de diferentes gastronomías y de nuevos estilos culinarios, como es el caso de la comida rápida y la fritura profunda. Esto ha favorecido cambios dietéticos a nivel global, generando un incremento en el consumo de aceites vegetales y grasas animales para la elaboración de los alimentos. Solo para el periodo 2022-2023 el consumo mundial de aceite de girasol fue de 18.5 millones de toneladas métricas, mientras que la producción de aceites vegetales en el mundo ascendió a 208.81 millones de toneladas métricas en el periodo 2021-2022 (Shahbandeh, 2023).

Se consideran aceites de cocina usados a las grasas animales y aceites vegetales empleados en procesos de preparación de alimentos a nivel industrial, doméstico, en restaurantes y hoteles (Awogbemi et al., 2021; Foo et al., 2021; Joshi et al., 2023; Lopes et al., 2020). Los aceites de cocina están mayormente constituidos por triglicéridos de cadena larga y ácidos grasos libres (Tabla 1), los cuales al ser sometidos a elevadas temperaturas (150 °C— 200 °C) en repetidos ciclos, incrementan su contenido de agua, se deterioran en sus propiedades químicas y sufren cambios físicos (color, viscosidad, densidad), favoreciendo la oxidación, la polimerización, la formación de compuestos volátiles (Awogbemi et al., 2021; Kumar y Negi, 2015) y com-

puestos tóxicos como la acrilamida, aldehídos y 4-hidroximetilfurfuran (Zahri et al., 2021).

Reutilizar estos aceites para la alimentación humana, puede ocasionar reacciones adversas a la salud, como dispepsia, dolor estomacal, diarrea e incluso enfermedades graves como cáncer intestinal o gástrico, incremento de especies reactivas de oxígeno (ROS), genotoxicidad e incremento de enfermedades cardiovasculares, por nombrar algunas (Foo et al., 2022; Liang et al., 2013; Perumalla Venkata & Subramanyam, 2016). Su uso para la alimentación animal tampoco está recomendado debido a la posible contaminación por la formación de dioxinas y su posterior bioacumulación dentro del tejido animal, que genera un efecto de bio magnificación a lo largo de la cadena de alimentos (Boatella-Riera & Codony, 2000).

Es difícil cuantificar de manera exacta la producción de los aceites de cocina usados debido a que en la mayoría de los países la producción es variable, incluso entre regiones de un mismo país, y no existe un control exacto sobre su descarga en aguas residuales o vertederos (Lopes et al., 2020). Sin embargo, se estima que en 2022 fueron generadas 16.54 millones de toneladas de aceite de cocina usado a nivel mundial, China produjo alrededor de 5.6 millones de toneladas (Tabla 2) o Brasil con una producción de cerca de 160 toneladas por mes, con apenas un 2.5 % reintroducido en el ciclo de producción (Foo et al., 2021, 2022; Lopes et al., 2020; Teixeira et al., 2018). Para México no se tienen datos exactos.

La disposición final de los aceites de cocina usados representa un reto importante debido a su alto volumen y su incorrecto desecho, ya que la mayor parte de lo que se produce en los hogares es vertido directamente a los sistemas de drenaje o en algunos casos envasados en botellas de plástico o vidrio y desechados posteriormente en los sistemas de recolección de la basura.

Este manejo incorrecto del aceite de cocina usado representa un problema ambiental severo, constituye el 25 % de los contaminantes en aguas residuales y produce efectos ambientales similares a los reportados por el petróleo (Popoola et al., 2022; Ulukardesler, 2023). Por ejemplo, cuando son desechados en el drenaje, pueden llegar a obstruir tuberías y plantas de tratamiento, incrementar la carga orgánica en las aguas subterráneas favoreciendo la eutrofización de los ecosistemas, formar capas de aceite sobre los cuerpos de agua impidiendo el paso de la luz solar y reduciendo el contenido de oxígeno disuelto. En el caso de derrames en el suelo, se favorece la proliferación de plagas como roedores, la presencia de olores de rancidez y puede recubrir el suelo aislándolo del aire y agua, lo que lleva a la muerte de la macro y microbiota de este (Foo et al., 2021; Hamdi et al., 2022; Lopes et al., 2020; Singh-Ackbarali et al., 2017).

Las lipasas en la biorremediación de aceites residuales

Una de las alternativas para la eliminación del aceite de cocina usado de las aguas residuales, es la

Tabla 1. Composición y propiedades del aceite de cocina usado.

Composición química	Porcentaje	Propiedad	Valor
Triglicérido	79.1	Índice de acidez	28.7 mg-KOH/g-aceite
Diglicérido	1.8	Índice de Yodo	88.6 g-I ₂ /100 g aceite
Monoglicéridos	2.2	Viscosidad	57.8 mPa/s
Ácidos grasos libres	16.9	Densidad	0.92 g/ml

Fuente: Tomada y adaptada de Liu, Y., Sotelo-Boyás, R., Murata, K., Minowa, T., & Sakanishi, K. (2012).

Tabla 2. Producción de aceites de cocina usados por país.

Países	Estimación de la producción (millones de toneladas por año)	Estimación de colecta (millones de toneladas por año)	Referencia
China	5.6	3.086-4.097	Kristiana et al., 2022; Lopes et al., 2020.
Estados Unidos de América	1.2	n/d*	Lopes et al., 2020.
India	1.1	0.224-0.326	Kristiana et al., 2022; Lopes et al., 2020.
Unión Europea y Reino Unido	1.6	0.7-1.2	Grinsven et al., 2020; Loizides et al., 2019.

*n/d: no determinado

Fuente: Elaboración propia (2023).

biorremediación por medio de lipasas que ayuden a su degradación, hidrolizando los triacilglicéridos, generando ácidos grasos libres y glicerol que son más fáciles de degradar (Figura 1). Las lipasas o triacilglicerol hidrolasas (EC 3.1.1.3) son un grupo de enzimas ampliamente distribuidas en la naturaleza (Casas-Godoy et al., 2018), que pueden realizar distintos tipos de reacciones catalíticas, ya sea de hidrólisis o de síntesis (esterificación, amidación, tioesterificación y transesterificación).

Algunos casos del uso exitoso de lipasas para biorremediación son el de Işık et al., (2021), quienes reportan el empleo de una lipasa de *Acinetobacter haemolyticus* inmovilizada en membrana de cáscara de huevo que retiene hasta el 50 % de su actividad después de 19 ciclos de uso, logrando hidrolizar diversos aceites comestibles mezclados con agua. Por su parte Kumar et al., (2012), indujeron la producción de lipasas en una cepa de *Penicillium chrysogenum* en medio sólido empleando como inductor: grasa y salvado de trigo (en una relación 1:1), la enzima fue purificada y posteriormente usada para determinar su actividad sobre el aceite de cocina usado, siendo capaz de hidrolizarlo.

Okino-Delgado (2017), evaluó diferentes protocolos para la concentración de lipasas obtenidas de desperdicios de naranja, con la finalidad de cuantificar la actividad lipolítica de estas sobre aceite de soja fresco y sometido a varios ciclos de calentamiento, observando la liberación de ácidos grasos en ambas muestras. Mientras que Selvam y Vishnupriya (2013) evaluaron la capacidad de biorremediación en efluentes de aguas residuales de mataderos empleando una cepa de *Streptomyces variabilis* NGP 3, observando hasta el 93.91 % de degradación de grasas en el cuarto día de tratamiento. Esta actividad lipolítica podría estar asociada a dos lipasas [Lipa 60 kilodalton (kDa) y Lipb 50 kDa] inducidas en este estudio.

Producción de biodiésel a partir aceites usados y lipasas

Otra de las alternativas para el aprovechamiento de los aceites de cocina usados, es emplearlos como materia prima para la producción de biodiésel, debido a su bajo costo y alta disponibilidad en comparación con los aceites vegetales refinados (Rodrigues et al., 2023). En la mayoría de los casos este biodiésel es

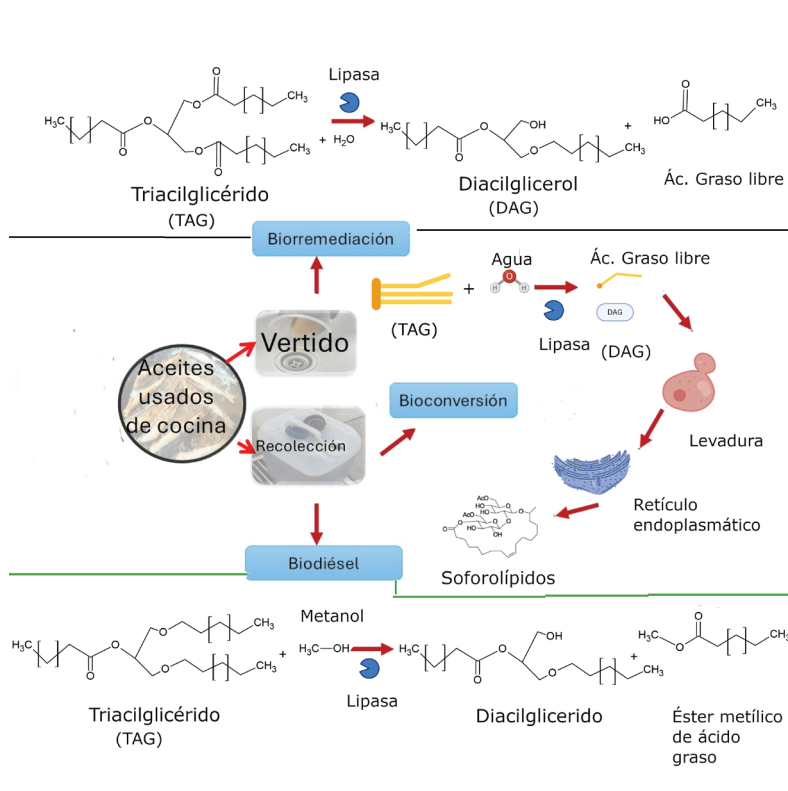


Figura 1. Representación gráfica de procesos que se pueden llevar a cabo con lipasas empleando como sustrato Aceites usados de cocina.
Fuente: Elaboración propia.

producido mediante una reacción química que emplea metanol (CH₃OH) e hidróxido de sodio (NaOH) como catalizador, pero esta presenta algunos inconvenientes cuando se trabaja con los aceites de cocina usados, ya que requieren un precalentamiento para la eliminación del agua contenida hasta llevarla a una concentración por debajo del 1 %. En cambio, si la producción de biodiésel se realiza mediante una catálisis enzimática empleando lipasas, este calentamiento del aceite de cocina usado no es requerido. Además, presenta algunas otras ventajas como son: la eliminación de efluentes alcalinos, facilitan la recuperación de glicerol, no forma jabones y transesterifican aceites de cocina usados con alta concentración de ácidos grasos libres y agua (Kalita et al., 2022).

Actualmente, muchos investigadores se enfocan en evaluar la capacidad de transesterificación de estas lipasas empleando distintos aceites residuales y metodologías de inmovilización, con el fin de hacer la tecnología viable económicamente (Tabla 3).

Biorremediación y Bioconversión de aceites usados empleando microorganismos

El empleo de microorganismos de manera directa para la biorremediación o la bioconversión de los aceites de cocinas usados en subproductos de valor agregado es una alternativa, que depende inicialmente de la degradación del triacilglicérido de manera extracelular, mediante el actuar de las lipasas y pos-

teriormente, la absorción de los ácidos grasos libres por la célula. En el caso de las células eucariotas, la degradación de estos ácidos grasos libres se realiza en dos etapas: la primera corresponde a la activación en el citoplasma y la entrada del ácido graso libre a la mitocondria mediante la adición de una molécula de coenzima A y la segunda etapa corresponde a la β-oxidación en el interior de la membrana mitocondrial (Bustamante-Torres et al., 2021).

Géneros como *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor*, *Curvularia*, *Yarrowia*, entre otros., se han estudiado para el aprovechamiento de los aceites residuales y su biotransformación a productos de valor agregado como ácidos orgánicos, surfactantes, tensoactivos o biomasa rica en lípidos (Gao et al., 2022; Hamdi et al., 2022). Papanikolau et al., (2011) evaluaron la capacidad de crecimiento y bioconversión por parte de cepas de *Aspergillus* y *Penicillium*, empleando aceite de oliva residual como fuente de carbono, observando una alta producción de biomasa en ambos hongos y la producción de ácido oxálico por una cepa de *Aspergillus* en concentraciones arriba de los 5 g l⁻¹, a la par cuantificaron la acumulación de lípidos en las cepas donde alcanzaron un 64 % (g/g) con respecto a la masa seca en una cepa de *Aspergillus* sp. ATHUM 3482.

Trabajos similares se han realizado con levaduras oleaginosas como es el caso de *Rhodospiridium to-*

Tabla 3. Lipasas empleadas para la producción de biodiésel a partir de aceites usados de cocina.

Microorganismo	Inmovilizado o libre	Proporción aceite: alcohol	Rendimiento (%)	Referencia
<i>Leonotis nepetifolia</i>	Libre	1:3	71.5	Ávila Vázquez et al., 2023
<i>Endomelanconiopsis endophytica</i>	Libre	1:3	89 -91	Rodrigues et al., 2023
<i>Aspergillus oryzae</i> y <i>Rhizomucor miehei</i>	Microcápsulas magnéticas de Fe ₃ O ₄ con quitosano	1:4	98.5	Wei et al., 2023
<i>Bacillus stearothermophilus</i> y <i>Staphylococcus aureus</i>	Inmovilizada CaCO ₃	1:6	97.66 ±0.57	Ben Bacha et al., 2022
<i>Bacillus stratosphericus</i> PSP8 lipasa	Inmovilizada en nano sílices funcionalizadas con amina	1:4.5	93.4	Ismail et al., 2022
Mezcla de lipasas de <i>Candida rugosa</i> y <i>Rhizomucor miehei</i>	Inmovilizada en polidioxibutirato	1:6	96.5	Binhayeeding et al., 2020
<i>Candida rugosa</i> LipA	Libre	1:7	94.6 ±1.4	Guo et al., 2020
<i>Thermomyces lanuginosus</i> (TL lipasa)	Inmovilizada en nanopartículas de Fe ₃ O ₄ /Au	1:6	90	Sarno & Iuliano, 2019
<i>Candida antártica</i> (CALB) y <i>Rhizomucor miehei</i> (RML)	Inmovilizada en sílice funcionalizada con resina epoxi	1:3	91.5	Babaki et al., 2017
<i>Candida antártica</i> (CALB)	Inmovilizada en nanopartículas magnéticas	1:9	62	Mehrasbi et al., 2017

Fuente: Modificada de Kalita, et al., (2022).

ruloides la cual fue sometida a una co-fermentación en donde se emplearon dos distintas fuentes de carbono (hidrolizados de residuos alimenticios y aceites de cocina usados), con la finalidad de evaluar la bioacumulación de lípidos en la biomasa microbiana, alcanzando rendimientos de 7.2 g/kg. Sin embargo, se observó una inhibición de la bioacumulación a concentraciones elevadas de aceites de cocina usados en el medio (Gao et al., 2022).

También se han hecho trabajos con bacterias y levaduras, en los cuales se emplean los aceites de cocina usados o residuales como fuente de carbono para el crecimiento y la producción de compuestos de valor agregado como son los bio surfactantes (Tabla 4), estos son moléculas que emulsifican hidrocarburos hidrofóbicos, reduciendo su tensión superficial y aumentando su solubilidad en agua (Shi et al., 2021). Actualmente, han surgido como una alternativa para la sustitución de los surfactantes químicos al ser de baja toxicidad y biodegradables (Dobler et al., 2016). Dentro de los principales bio surfactantes producidos por microorganismos empleando los aceites residuales de cocina se destacan: los Soforolípidos y Ramnolípidos.

- Soforolípidos: Pertenecen a un grupo de glicolípidos que se encuentran constituidos por un dímero de glucosa unido mediante un enlace 1,2 y una cadena larga de ácido graso unida mediante un enlace glucosídico (Liepins et al., 2021), pueden

presentarse en una configuración cerrada (lactónico) o abierta (ácida), de la cual dependerán sus aplicaciones. Se emplea en la elaboración de empaques para alimentos debido a su actividad antimicrobiana, como promotor del crecimiento en plantas y protección contra patógenos (Pal et al., 2023). Se emplean en cosméticos y productos de cuidado personal cumpliendo funciones como emulsificador agente formado de espumas, solubilizador y agente humectante, etc., teniendo buena compatibilidad con las células de la piel y excelentes propiedades hidratantes (Filipe et al., 2022; Lourith & Kanlayavattanakul, 2009).

- Ramnolípidos: Constituida por una o dos moléculas de azúcares de ramnosa y un ácido graso hidroxilado de cadena variable que puede ir desde los 8 carbonos hasta los 22. Se emplean en cosméticos y productos de cuidado personal, procesamiento de alimentos, biorremediación, agricultura y farmacéutica (Chong & Li, 2017).

Conclusiones

Los aceites de cocina usados representan una problemática severa hoy en día, debido a los problemas ambientales y de salud que conlleva su reúso y eliminación, por lo que se requiere la generación de protocolos de recuperación eficientes que no se enfoquen únicamente en la recolección de lo producido a gran escala, sino también en la captación del aceite producido en los hogares, ya que estos son los que se

Tabla 4. Producción de biosurfactantes empleando aceites residuales de cocina como fuente de carbono.

Biosurfactante	Microorganismo	Fuente de carbono	Condiciones de fermentación	Rendimientos	Referencia
Soforolípidos	<i>Starnerella bombicola</i> (CGMCC1576)	Aceite de Girasol Aceite usado frito Aceite usado y fresco de Tung (<i>Vernicia fordii</i>)	25 °C, 700 rpm por 7 días	44.52 g/L 39.09 g/L Sin resultado	Wang et al., 2024
	<i>Candida parapsilosis</i>	Aceite de fritura de desecho	Fermentación en fase sólida, pH 7.2 28°C por 5 días	39 g/ 100 g de sustrato	Al-kashef et al., 2023
	<i>Starnerella bombicola</i>	Aceite de cocina usado	Fed-Batch 25 C, pH 3.5, Tasa de aireación 1 vvm	84.8 g/L	Kim et al., 2021
Ramnolípidos	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> OG1	Aceites de fritura de desecho	30 °C, 150 rpm y 192 h	13.31 g/L	Ozdal et al., 2017
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> MTCC 2297	Aceite de coco usado	37 °C, sin agitación, pH 5.5-8, 192 h	2.26 g/L	George & Jayachandran, 2013
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> M4	Aceite de cocina usado	35 °C por 20 h	1.119 g/L	Shi et al., 2021
	<i>Pseudomonas putida</i>	Aceite de cocina usado para fritura		4.1 g/L	Raza et al., 2020

Fuente: Modificado de Fraga et al., (2021).

vierten la mayoría de las veces al sistema de drenaje. Asimismo, es necesario generar tecnologías que permitan darle un valor agregado al aceite residual recolectado, para que sea reintroducido con éxito en el ciclo de producción; en este sentido, el estudio y el desarrollo de tecnologías que emplean lipasas ya sea para la transesterificación, bioconversión o para la biorremediación de los aceites de cocina usados, es una alternativa viable que lleva algún tiempo siendo estudiada y a la que valdría la pena dedicar más investigación para la adecuada transferencia tecnológica, pues desafortunadamente hasta ahora no se ha podido pasar de las pruebas piloto a la aplicación a gran escala.

Referencias

- Al-kashef, A. S., Nooman, M. U., Rashad, M. M., Hashem, A. H., & Abdelraof, M. (2023). Production and optimization of novel Sphorolipids from *Candida parapsilosis* grown on potato peel and frying oil wastes and their adverse effect on Mucorales fungal strains. *Microbial Cell Factories*, 22(1), 79. <https://doi.org/10.1186/s12934-023-02088-0>
- Awogbemi, O., Kallon, D. V. V., Aigbodion, V. S., & Panda, S. (2021). Advances in biotechnological applications of waste cooking oil. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100158. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2021.100158>
- Babaki, M., Yousefi, M., Habibi, Z., & Mohammadi, M. (2017). Process optimization for biodiesel production from waste cooking oil using multi-enzyme systems through response surface methodology. *Renewable Energy*, 105, 465-472. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.086>
- Binhayeeding, N., Klomklao, S., Prasertsan, P., & Sangkharak, K. (2020). Improvement of biodiesel production using waste cooking oil and applying single and mixed immobilised lipases on polyhydroxyalkanoate. *Renewable Energy*, 162, 1819-1827. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.009>
- Boatella-Riera, J., & Codony, R. (2000). *Recycled Cooking Oils: Assessment of risks for public health*. [Working document for the STOA Panel].
- Bustamante-Torres, M., Romero-Fierro, D., Estrella-Núñez, J., & Bucio, E. (2021). Microbial Degradation of Lipids. En . Inamuddin, M. I. Ahamed, & R. Prasad (Eds.), *Recent Advances in Microbial Degradation* (pp. 251-272). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0518-5_9
- Casas-Godoy, L., Gasteazoro, F., Duquesne, S., Bordes, F., Marty, A., & Sandoval, G. (2018). Lipases: An Overview. En G. Sandoval (Ed.), *Lipases and Phospholipases* (Vol. 1835, pp. 3-38). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8672-9_1
- Chong, H., & Li, Q. (2017). Microbial production of rhamnolipids: Opportunities, challenges and strategies. *Microbial Cell Factories*, 16(1), 137. <https://doi.org/10.1186/s12934-017-0753-2>
- Dobler, L., Vilela, L. F., Almeida, R. V., & Neves, B. C. (2016). Rhamnolipids in perspective: Gene regulatory pathways, metabolic engineering, production and technological forecasting. *New Biotechnology*, 33(1), 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2015.09.005>
- Filipe, G. A., Bigotto, B. G., Baldo, C., Gonçalves, M. C., Kobayashi, R. K. T., Lonni, A. A. S. G., & Celligoi, M. A. P. C. (2022). Development of a multifunctional and self-preserving cosmetic formulation using sphorolipids and palmarosa essential oil against acne-causing bacteria. *Journal of Applied Microbiology*, 133(3), 1534-1542. <https://doi.org/10.1111/jam.15659>
- Foo, W. H., Chia, W. Y., Tang, D. Y. Y., Koay, S. S. N., Lim, S. S., & Chew, K. W. (2021). The conundrum of waste cooking oil: Transforming hazard into energy. *Journal of Hazardous Materials*, 417, 126129. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126129>
- Foo, W. H., Koay, S. S. N., Chia, S. R., Chia, W. Y., Tang, D. Y. Y., Normanbhay, S., & Chew, K. W. (2022). Recent advances in the conversion of waste cooking oil into value-added products: A review. *Fuel*, 324, 124539. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124539>
- Fraga, J. L., Pereira, A. D. S., Diniz, M. M., Fickers, P., & Amaral, P. F. F. (2021). Valorization of urban waste oil by microbial conversions. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100145. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2021.100145>
- Gao, Z., Ma, Y., Liu, Y., & Wang, Q. (2022). Waste cooking oil used as carbon source for microbial lipid production: Promoter or inhibitor. *Environmental Research*, 203, 111881. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111881>
- George, S., & Jayachandran, K. (2013). Production and characterization of rhamnolipid biosurfactant from waste frying coconut oil using a novel *Pseudomonas aeruginosa* D. *Journal of Applied Microbiology*, 114(2), 373-383. <https://doi.org/10.1111/jam.12069>
- Grinsven, A. van, Kampman, B., van den Toorn, E., & van der Veen, R. (2020). *Used Cooking Oil (UCO) as biofuel feedstock in the EU*. CE Delft - EN. <https://cedelft.eu/publications/used-cooking-oil-ucos-biofuel-feedstock-in-the-eu/>
- Guo, J., Sun, S., & Liu, J. (2020). Conversion of waste frying palm oil into biodiesel using free lipase A from *Candida antarctica* as a novel catalyst. *Fuel*, 267, 117323. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117323>
- Hamdi, N. A., Sha'arani, S., Azman, N. F., Rafi, S. B. Mohd., Norsin, E., & Othman, N. (2022). Management of Waste Cooking Oil and its Potential for Value-added Materials: A Mini Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1091(1), 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1091/1/012054>
- Işık, C., Saraç, N., Teke, M., & Uğur, A. (2021). A new bioremediation method for removal of wastewater containing oils with high oleic acid composition: *Acinetobacter haemolyticus* lipase immobilized on eggshell membrane with improved stabilities. *New Journal of Chemistry*, 45(4), 1984-1992. <https://doi.org/10.1039/D0NJ05175F>
- Ismail, A. R., Kashtoh, H., Betiha, M. A., Abu Amr, S. A., Baek, K.-H., & El-Gendy, N. Sh. (2022). Valorization of Waste Cooking Oil into Biodiesel via *Bacillus stratosphericus* Lipase Amine-Functionalized Mesoporous SBA-15 Nanobiocatalyst. *International Journal of Chemical Engineering*, 2022, 1-20. <https://doi.org/10.1155/2022/7899996>
- Joshi, J. R., Bhandari, K. K., & Patel, J. V. (2023). Waste cooking oil as a promising source for bio lubricants- A review. *Journal of the Indian Chemical Society*, 100(1), 100820. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100820>
- Kalita, P., Basumatary, B., Saikia, P., Das, B., & Basumatary, S. (2022). Biodiesel as renewable biofuel produced via enzyme-based catalyzed transesterification. *Energy Nexus*, 6, 100087. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100087>

- Kim, J.-H., Oh, Y.-R., Hwang, J., Kang, J., Kim, H., Jang, Y.-A., Lee, S.-S., Hwang, S. Y., Park, J., & Eom, G. T. (2021). Valorization of waste-cooking oil into sophorolipids and application of their methyl hydroxyl branched fatty acid derivatives to produce engineering bioplastics. *Waste Management*, 124, 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.003>
- Kristiana, T., Baldino, C., & Searle, S. (2022). An estimate of current collection and potential collection of used cooking oil from major Asian exporting countries. *ICCT Working Paper*, 13.
- Kumar, S., Mathur, A., Singh, V., Nandy, S., Khare, S. K., & Negi, S. (2012). Bioremediation of waste cooking oil using a novel lipase produced by *Penicillium chrysogenum* SNP5 grown in solid medium containing waste grease. *Bioresource Technology*, 120, 300-304. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.018>
- Kumar, S., & Negi, S. (2015). Transformation of waste cooking oil into C-18 fatty acids using a novel lipase produced by *Penicillium chrysogenum* through solid state fermentation. *3 Biotech*, 5(5), 847-851. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0268-z>
- Liang, S., Liu, Z., Xu, M., & Zhang, T. (2013). Waste oil derived bio-fuels in China bring brightness for global GHG mitigation. *Bioresource Technology*, 131, 139-145. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.008>
- Liepins, J., Balina, K., Soloha, R., Berzina, I., Lukasa, L. K., & Dace, E. (2021). Glycolipid Biosurfactant Production from Waste Cooking Oils by Yeast: Review of Substrates, Producers and Products. *Fermentation*, 7(3), 136. <https://doi.org/10.3390/fermentation7030136>
- Loizides, M., Loizidou, X., Orthodoxou, D., & Petsa, D. (2019). Circular Bioeconomy in Action: Collection and Recycling of Domestic Used Cooking Oil through a Social, Reverse Logistics System. *Recycling*, 4(2), 16. <https://doi.org/10.3390/recycling4020016>
- Lopes, M., Miranda, S. M., & Belo, I. (2020). Microbial valorization of waste cooking oils for valuable compounds production – a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(24), 2583-2616. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1704602>
- Lourith, N., & Kanlayavattanakul, M. (2009). Natural surfactants used in cosmetics: Glycolipids. *International Journal of Cosmetic Science*, 31(4), 255-261. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2494.2009.00493.x>
- Okino-Delgado, C. H., Prado, D. Z. D., Facanali, R., Marques, M. M. O., Nascimento, A. S., Fernandes, C. J. D. C., Zambuzzi, W. F., & Fleuri, L. F. (2017). Bioremediation of cooking oil waste using lipases from wastes. *PLOS ONE*, 12(10), e0186246. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186246>
- Ozdal, M., Gurkok, S., & Ozdal, O. G. (2017). Optimization of rhamnolipid production by *Pseudomonas aeruginosa* OG1 using waste frying oil and chicken feather peptone. *3 Biotech*, 7(2), 117. <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0774-x>
- Pal, S., Chatterjee, N., Das, A. K., McClements, D. J., & Dhar, P. (2023). Sophorolipids: A comprehensive review on properties and applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 313, 102856. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.102856>
- Papanikolaou, S., Dimou, A., Fakas, S., Diamantopoulou, P., Philippousis, A., Galiotou-Panayotou, M., & Aggelis, G. (2011). Biotechnological conversion of waste cooking olive oil into lipid-rich biomass using *Aspergillus* and *Penicillium* strains: Waste oil valorization by higher fungi. *Journal of Applied Microbiology*, 110(5), 1138-1150. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2011.04961.x>
- Perumalla Venkata, R., & Subramanyam, R. (2016). Evaluation of the deleterious health effects of consumption of repeatedly heated vegetable oil. *Toxicology Reports*, 3, 636-643. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2016.08.003>
- Popoola, B. M., Olanbiwoninu, A. A., & Fashogbon, R. O. (2022). Bioremediation of Vegetable Oil Contaminated Soil with Two Microbial Isolates. *Advances in Microbiology*, 12(04), 218-241. <https://doi.org/10.4236/aim.2022.124017>
- Raza, Z. A., Khalid, Z. M., Ahmad, N., & Tehseen, B. (2020). Statistical Optimisation of Rhamnolipid Production using a *Pseudomonas putida* Strain Cultivated on Renewable Carbon Sources of Waste Vegetable Oils. *Tenside Surfactants Detergents*, 57(1), 13-21. <https://doi.org/10.3139/113.110664>
- Rodrigues, J. G. C., Cardoso, F. V., Santos, C. C. D., Matias, R. R., Machado, N. T., Duvoisin Junior, S., & Albuquerque, P. M. (2023). Biocatalyzed Transesterification of Waste Cooking Oil for Biodiesel Production Using Lipase from the Amazonian Fungus *Endomelanconopsis endophytica*. *Energies*, 16(19), 6937. <https://doi.org/10.3390/en16196937>
- Sarno, M., & Iuliano, M. (2019). Biodiesel production from waste cooking oil. *Green Processing and Synthesis*, 8(1), 828-836. <https://doi.org/10.1515/gps-2019-0053>
- Selvam, K., & Vishnupriya, B. (2013). Partial purification of lipase from *Streptomyces variabilis* NGP 3 and ITS application in bioremediation of waste water. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 4(11), 4281-4289.
- Shahbandeh, M. (2023). *Vegetable oils consumption worldwide 2022/23*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/263937/vegetable-oils-global-consumption/>
- Shi, J., Chen, Y., Liu, X., & Li, D. (2021). Rhamnolipid production from waste cooking oil using newly isolated halotolerant *Pseudomonas aeruginosa* M4. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123879. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123879>
- Singh-Ackbarali, D., Maharaj, R., Mohamed, N., & Ramjattan-Harry, V. (2017). Potential of used frying oil in paving material: Solution to environmental pollution problem. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(13), 12220-12226. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8793-z>
- Teixeira, M. R., Nogueira, R., & Nunes, L. M. (2018). Quantitative assessment of the valorisation of used cooking oils in 23 countries. *Waste Management*, 78, 611-620. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.039>
- Ulukardesler, A. H. (2023). Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using Different Types of Catalysts. *Processes*, 11(7), 2035. <https://doi.org/10.3390/pr11072035>
- Wang, H., Gao, R., Song, X., Yuan, X., Chen, X., & Zhao, Y. (2024). Study on the production of Sophorolipid by *Starmerella bombicola* yeast using fried waste oil fermentation. *Bioscience Reports*, 44(2), BSR20230345. <https://doi.org/10.1042/BSR20230345>
- Zahri, K. N. M., Zulkharnain, A., Sabri, S., Gomez-Fuentes, C., & Ahmad, S. A. (2021). Research Trends of Biodegradation of Cooking Oil in Antarctica from 2001 to 2021: A Bibliometric Analysis Based on the Scopus Database. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 2050. <https://doi.org/10.3390/ijerph18042050>