

Tecnologías de residuos cero para el desarrollo sostenible en las plantas de beneficio de aceite de palma*

Zero Waste Technologies for Sustainable Development in Palm Oil Mills

CITACIÓN: Teow Yeit Haan & Mohd Sobri Takriff. (2022). Tecnologías de residuos cero para el desarrollo sostenible en las plantas de beneficio de aceite de palma (Traductor Arenas, C.). *Palmas*, 43(3), 40-55.

PALABRAS CLAVE: Biohidrógeno, Energía renovable, Nanocarbono, Biofertilizante orgánico, Secuestro de CO₂, Recuperación de agua.

KEYWORDS: Biohydrogen, Renewable energy, Nanocarbon, Organic biofertiliser, CO₂ sequestration, Water recovery.

Derechos de autor: © 2021 Teow Yeit Haan

Este es un artículo de acceso abierto que permite su uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre y cuando se cite adecuadamente el trabajo original.

* Traducido del original Zero Waste Technologies for Sustainable Development in Palm Oil Mills, publicado en la revista *Journal of Oil Palm, Environment & Health* 2021, 12:55-68. doi:10.5366/jope.2021.04. Publicación oficial del Consejo Malayo para el Aceite de Palma (MPOC por sus siglas en inglés).

TEOW YEIT HAAN

Departamento de Ingeniería Química y Procesos y Centro de Investigación para la Tecnología de Procesos Sostenibles*

Autor de correspondencia
yh_teow@ukm.edu.my

MOHD SOBRI TAKRIFF

Departamento de Ingeniería Química y Procesos y Centro de Investigación para la Tecnología de Procesos Sostenibles*

* Facultad de Ingeniería y Entorno Construido, Universidad Kebangsaan Malasia, 43500 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malasia.

Resumen

Una planta de beneficio piloto instalada para el proyecto Tecnología de Residuos Cero UKM-YSD en la planta de beneficio de aceite de palma Sime Darby's Palm Oil Tennamaram, en Bestari Jaya, Selangor, cuenta con varias tecnologías para el desarrollo sostenible. El proyecto transforma una infraestructura ordinaria en una fábrica de tecnología verde. Se identificaron siete áreas de impacto estratégicas para abordar los desafíos de sostenibilidad del procesamien-

to del aceite de palma, entre los que se encuentran, la descarga de una gran cantidad de efluentes altamente contaminantes, la emisión de gases efecto invernadero (GEI) y la generación de muchos residuos sólidos. Los enfoques adoptados en este programa de investigación generaron energía renovable a partir de los efluentes de las plantas de beneficio de aceite de palma (POME por sus siglas en inglés) y el hidrolizado de racimos de fruta vacíos (RFV) pretratados en la producción de biohidrógeno. El POME del fermentador de 2 etapas de biohidrógeno y biometano se sometió a un tratamiento integrado de aguas residuales con algas y secuestro de CO₂ y procesos de tratamiento de filtración de membrana integrados en la recuperación de agua tratada para alimentar las calderas. Por otro lado, los RFV y el POME, junto con los sólidos residuales y la biomasa de algas producida a partir de estas tecnologías de cero residuos, se utilizaron para producir fertilizantes orgánicos. Los resultados de la operación de la planta piloto mostraron que el POME y la biomasa sólida podrían usarse para generar un 20 % adicional de energía renovable en comparación con las tecnologías implementadas en las plantas de beneficio existentes a 1.020 t/d de descarga de POME. Se produjo fertilizante orgánico a menor costo y en menos tiempo, así como se recuperó agua para ser utilizada para alimentar las calderas. La planta piloto de cero residuos UKM-YSD sirve como tecnología pionera con la posibilidad de cambiar las percepciones, especialmente entre los importadores extranjeros, y mostrar que la producción de aceite de palma puede ser respetuosa con el medio ambiente.

Abstract

A pilot plant installed for the UKM-YSD *Zero Waste Technology* project at the Sime Darby's Palm Oil Tenna-maram mill, Bestari Jaya, Selangor features various technologies for sustainable development. It transforms a regular mill into a green technology factory. Seven strategic thrust areas were identified to address the sustainability challenges of palm oil processing, namely the discharge of a large amount of highly polluting effluent, emission of greenhouse gases (GHGs), and generation of a large amount of solid waste. The approaches adopted in this research programme generated renewable energy from palm oil mill effluent (POME) and pre-treated empty fruit bunches (EFB) hydrolysate in biohydrogen production. POME from biohydrogen and biomethane two-stage fermenter was then subjected to integrated algae wastewater treatment and CO₂ sequestration and integrated membrane filtration treatment processes in recovering treated water for boiler feed application. On the other hand, EFB and POME, along with residual solids and algae biomass produced from these zero waste technologies, were used to produce organic fertiliser. The results of the pilot plant operation showed that POME and solid biomass could be used to generate additional 20% renewable energy compared to the technologies practised in existing mills at 1,020 t/d of POME discharge. Organic fertiliser was produced at a lower cost and in a shorter duration, as well as water being recovered to be used as boiler feed water. The UKM-YSD Zero Waste pilot plant serves as a pioneering technology with the possibility of changing perceptions, especially among foreign importers, that palm oil production can be environmentally friendly.

1. Introducción

En febrero de 2010, la Universidad Kebangsaan Malasia (UKM) y otras siete universidades públicas recibieron una invitación de Yayasan Sime Darby (YSD) para presentar una propuesta para el establecimiento de una cátedra de investigación sobre el desarrollo sostenible para promover la conservación del medio ambiente y la protección de los eco-

sistemas. YSD cooperó con varias de las principales universidades de Malasia en un conjunto de criterios de evaluación mediante la prestación de apoyo financiero para la investigación y otras actividades pertinentes sobre el desarrollo sostenible. La propuesta integral de UKM sobre el procesamiento de residuos cero fue elegida líder para dirigir un estudio sobre el aceite de palma sostenible para hacer de Malasia un modelo para el mundo.

La industria del aceite de palma es un motor clave para el desarrollo rural en Malasia. Esta proporciona empleo a casi 1 millón de habitantes malayos¹. Sin embargo, se enfrenta a numerosos desafíos ambientales debido a los residuos que genera durante los procesos de producción. Por ejemplo, por cada tonelada de racimos de fruta fresca (RFF) procesada, se generan 0,5-0,7 toneladas de efluente de las plantas de beneficio de aceite de palma (POME por sus siglas en inglés) y 0,37 toneladas de residuos sólidos.

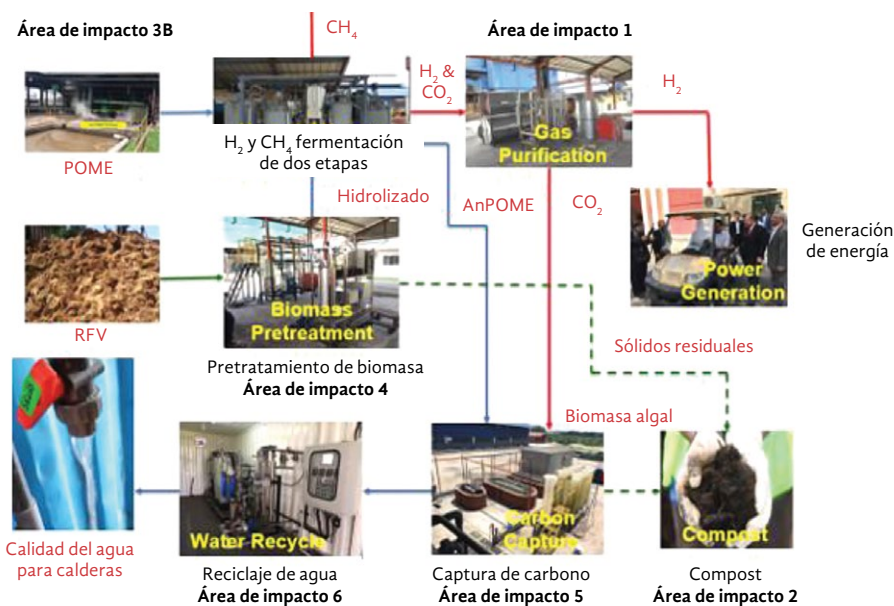
Los residuos sólidos se componen de 0,22 toneladas de racimos de fruta vacío (RFV), 0,06 toneladas de cáscara de la almendra del fruto y 0,09 toneladas de fibras². El POME, que es la mayor fuente de contaminación de aguas residuales industriales con una demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y una demanda química de oxígeno (DQO) extremadamente altas, plantea una gran amenaza para el ambiente acuoso debido al agotamiento de oxígeno y graves problemas de contaminación³. El POME se trabaja convencionalmente mediante tratamiento biológico en estanques abiertos. No obstante, este método convencional emite gases efecto invernadero (GEI) como metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2)⁴. Se ha informado que 70 % de los GEI emitidos por las plantas de beneficio de aceite de palma son aportados por el POME⁵.

El programa de investigación de cero residuos UKM-YSD consta de siete áreas de impacto:

- i. Área de impacto 1: hidrógeno (H_2) para la generación de energía.
- ii. Área de impacto 2A: bioconversión de RFV y POME en fertilizante orgánico.
- iii. Área de impacto 3A: conversión de nanocarbono y CH_4 a H_2 .
- iv. Área de impacto 3B: utilización de POME e hidrolizado de RFV para la producción de biohidrógeno.
- v. Área de impacto 4: pretratamiento de biomasa para la producción de biohidrógeno.
- vi. Área de impacto 5: secuestro de CO_2 y tratamiento de efluentes con algas.
- vii. Área de impacto 6: reciclaje y reutilización del agua.

La Figura 1 muestra el concepto de la estrategia integrada de residuos cero en el procesamiento de aceite de palma. El POME liberado por una planta de beneficio de aceite de palma y los RFV pretratados del área de impacto 4 se someten a fermentación de 2 etapas de biohidrógeno y biometano en el área de impacto 3B.

Figura 1: Estrategia integrada de procesamiento de aceite de palma de residuos cero



El producto de este último es biohidrógeno, que luego se envía para su purificación en el área de impacto 1 para la generación de energía. Mientras tanto, el POME anaeróbico descargado del área de impacto 3B (después de la producción de biohidrógeno) y el CO₂ extraído en el área de impacto 1 se transfieren al área 5. El secuestro de CO₂ con algas y el tratamiento de efluentes de la planta de beneficio de aceite de palma se llevan a cabo en el área de impacto 5. Adicionalmente, en el área 6 se utiliza un sistema de filtración de membrana integrado para tratar adicionalmente el POME y lograr la calidad de alimentación de la caldera. Por otro lado, se utilizan los RFV y los sólidos residuales producidos a partir de estas tecnologías de residuos cero para producir fertilizantes orgánicos en el área de impacto 2.

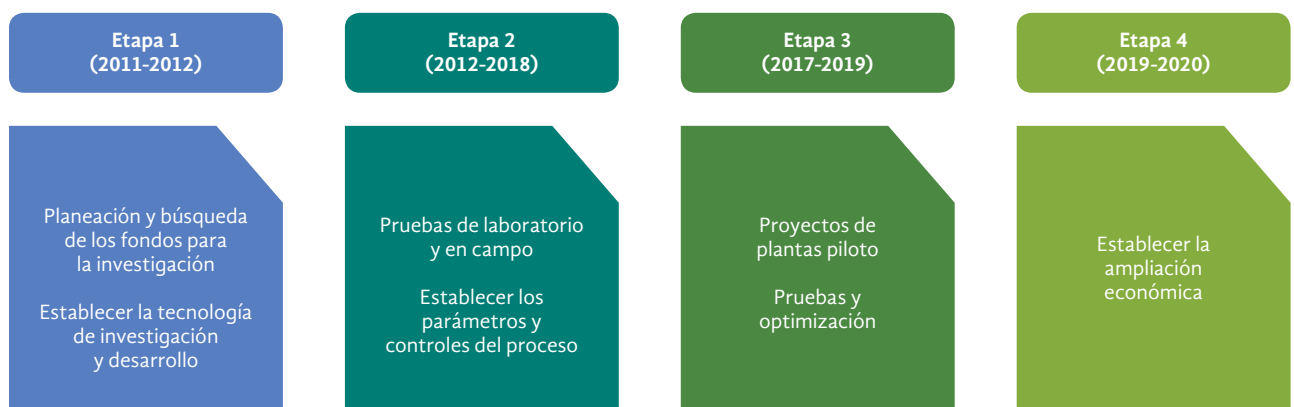
El programa de investigación de residuos cero UKM-YSD tiene como objetivo convertir las plantas de beneficio de aceite de palma en fábricas verdes, neutras en carbono y con cero descargas al aire, suelo y agua. La estrategia integrada de procesamiento de aceite de palma con residuos cero aumentará los ingresos y mejorará la sostenibilidad de esta industria simultáneamente. En esta estrategia, los subproductos generados por el procesamiento en la planta de beneficio de aceite de palma se convierten en recursos para otros procesos, eliminando así los residuos. Los subproductos se utilizan para la generación de energía renovable, la producción de biofertilizantes y la recuperación y reutilización de los efluentes tratados. La Figura 2 muestra la línea de tiempo del desarrollo del proyecto de Tecnología de Residuos Cero UKM-YSD.

2. Área de impacto 1: hidrógeno para la generación de energía

El área de impacto 1 implica la investigación sobre la purificación del biohidrógeno para la generación de energía. El H₂ es energía renovable limpia que reduce la dependencia de los combustibles fósiles⁶. Se puede utilizar el biohidrógeno producido a partir del POME e hidrolizado de RFV en fermentación (área de impacto 3B) o una mezcla de gases formulada en sistemas de celdas de combustible para generar electricidad y para otras aplicaciones industriales. El biogás producido a partir del área de impacto 3B es una mezcla de H₂ y CO₂ que, posiblemente, contiene alguna cantidad de monóxido de carbono (CO), CH₄ y/o sulfuro de hidrógeno (H₂S). Sin embargo, el biohidrógeno necesita alcanzar una pureza de 99,9 % para su aplicación en un sistema de pilas de combustible de membrana electro-lítica polimérica (PEMFC por sus siglas en inglés). La presencia de CO y H₂S puede afectar la función de los componentes de las pilas de combustible, como los catalizadores y la membrana. Estos se pueden adsorber en los sitios activos de los catalizadores, que bloquean el catalizador para la reacción deseada. Esto conduce a un exceso de potencial en los electrodos, lo que en consecuencia disminuye el rendimiento del PEMFC debido a la reducción de la potencia de las pilas⁷.

La purificación de biohidrógeno se realizó utilizando tecnología de adsorción-desorción con un carbón activado comercial adsorbente de bajo costo y eficiente (CA-comercial) (tamaño de partícula: 3,0-4,2 mm)

Figura 2. Línea de tiempo del desarrollo del proyecto de Tecnología de Residuos Cero UKM-YSD



suministrado por Effigen Carbon Sdn. Bhd⁸. El CA es un adsorbente sólido adecuado para CO₂ y otros gases contaminantes porque no se requiere eliminar la humedad. Además, puede lograr una alta capacidad de adsorción de CO₂ y es fácil de regenerar. La alta capacidad de adsorción de CO₂ se obtuvo a una presión de 1,5-2,0 bar y a una temperatura de 60 °C. Esta afirmación está respaldada por las curvas de penetración de adsorción de los diferentes CA utilizados (Figura 3). Como se muestra, el CA-comercial tuvo el tiempo de penetración más corto (12,3 min) en el logro de la adsorción de CO₂ mediante la captura química de CO₂ a través del proceso de quimisorción⁶ en comparación con el CA⁸ modificado.

Una vez terminado el ciclo de adsorción, el CA gastado se regeneró mediante desorción en un adsorbente con el uso de aire comprimido. Se realizaron ciclos de adsorción-desorción para determinar la reutilización (es decir, la eficiencia de desorción) del CA. El CA-comercial mostró el perfil de adsorción-desorción más bajo (500 min, como se muestra en la Figura 4) debido a la baja capacidad de adsorción: por lo tanto, se necesitó menos tiempo para la etapa de regeneración⁸.

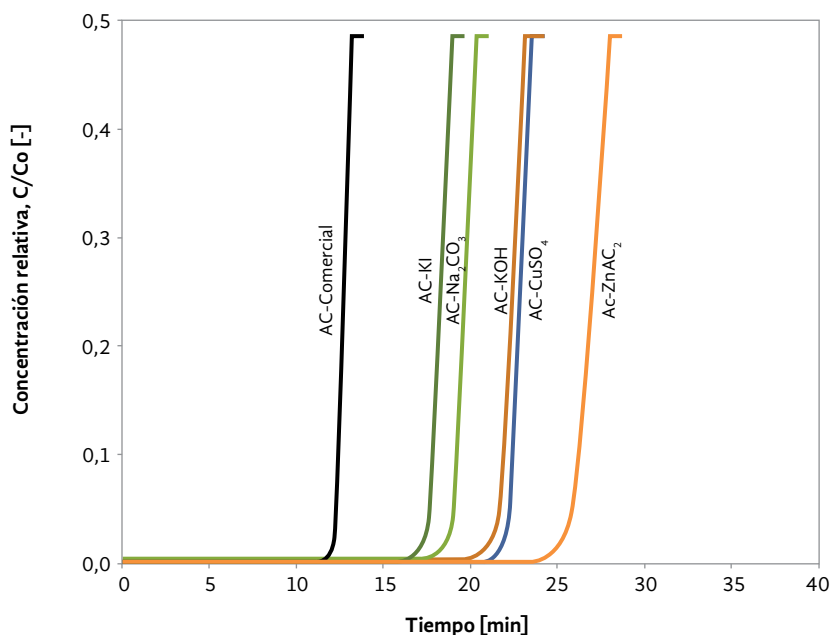
El biohidrógeno producido a partir de la tecnología de adsorción-desorción logró una pureza de H₂ de más de 90 %⁹. El CO₂ adsorbido con una concentración en el rango de 30-40 % en volumen se envió al área de impacto 5 para el secuestro de CO₂ con microalgas. El H₂ purificado suministrado al siste-

ma PEMFC logró generar electricidad, que luego se utilizó para mover un carro *buggy* modificado. Este sistema de integración de biohidrógeno y pilas de combustible es beneficioso para crear un suministro de energía sostenible y minimizar los residuos y la contaminación utilizando este compuesto como recurso verde.

3. Área de impacto 2: bioconversión de RFV y POME en fertilizante orgánico

Los RFV y los sólidos residuales producidos a partir del procesamiento integrado de aceite de palma con residuos cero se convierten en fertilizantes orgánicos en el área de impacto 2. Tanto los RFV como el POME se utilizan potencialmente como materias primas para su conversión en fertilizantes orgánicos, ya que contienen un alto contenido de materia orgánica y nutrientes que pueden reciclarse en el suelo. En algunas fincas de palma de aceite, los RFV se han utilizado como agente acondicionador del suelo. Estos últimos pueden mejorar la estructura del mismo, aumentar la capacidad de retención de agua y el pH del suelo. Aunque los RFV se utilizan para el compostaje natural en la plantación de palma de aceite, el proceso de degradación es largo. Además, los fertilizantes nitrogenados suministrados a las palmas de aceite no serán totalmente absorbidos por los árboles, ya que parte del abono es consumido por los microbios para degradar los RFV.

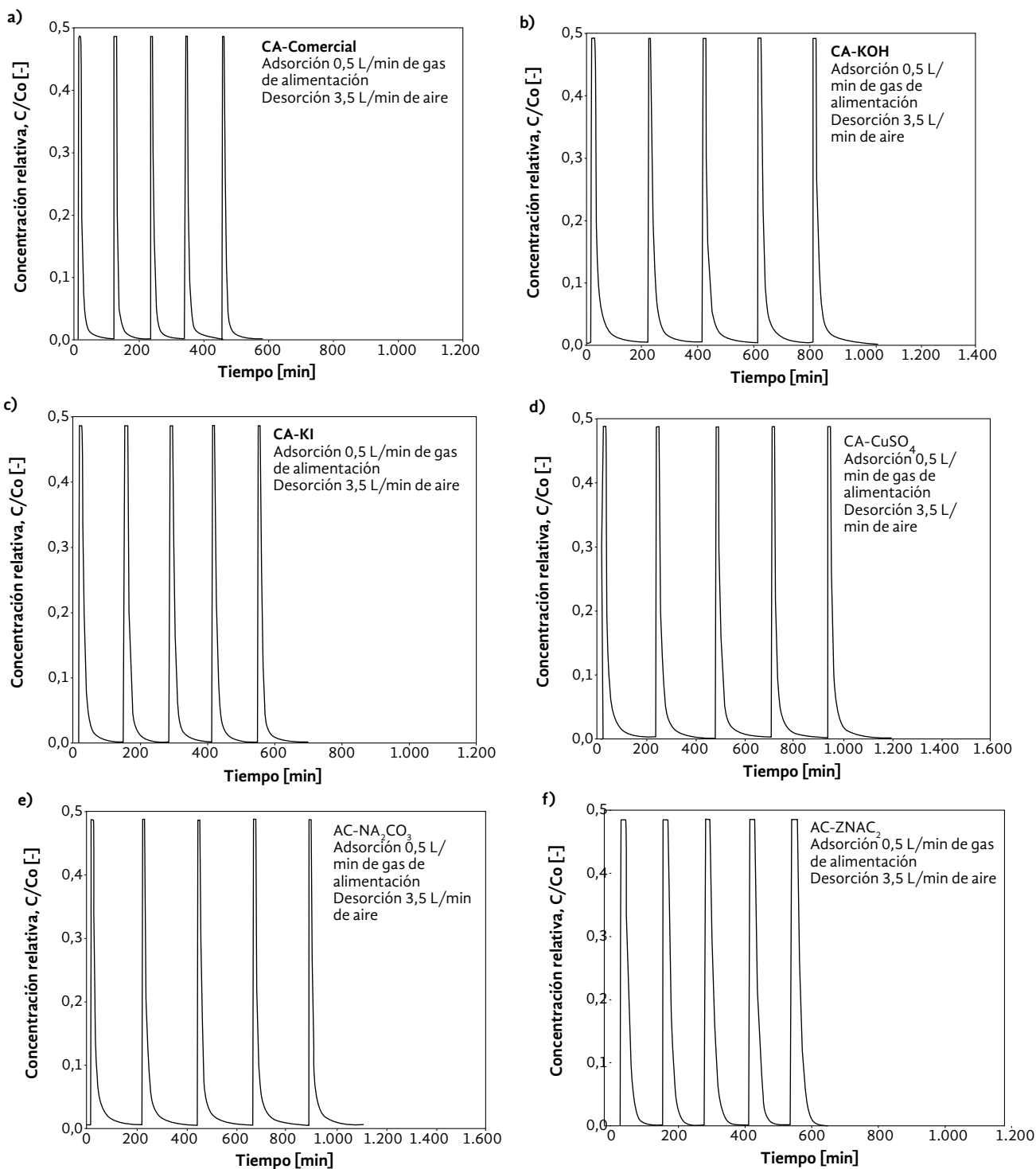
Figura 3. Curvas de penetración de adsorción de CO₂ adsorbidas en CA fresco⁸



La conversión de RFV y POME en fertilizante orgánico llevaría al menos dos o tres meses. Sin embargo, el periodo de compostaje puede reducirse con una estrategia adecuada. El uso de microorganismos

autóctonos para la conservación y utilización de nuevos recursos es concomitante con la Tercera Política Agrícola Nacional (NAP3 por sus siglas en inglés). Las actividades de microorganismos desempeñan un

Figura 4. Perfiles de adsorción-desorción de CO₂ del CA durante cinco ciclos: (a) CA-comercial, (b) CA-KOH, (c) CA-KI, (d) CA-CuSO₄, (e) CA-Na₂CO₃ y (f) CA-ZnAC₂⁸



papel importante en los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno, azufre y otros elementos, lo que permite a los ecosistemas reciclar estas sustancias en una forma utilizable de organismos vivos. Aparte de los microorganismos *in situ*, la introducción de consorcios microbianos es esencial para seguir promoviendo este proceso.

En la etapa inicial del área de impacto 2, el microorganismo termófilo se aisló y se identificó para mejorar la formulación de los consorcios de bacterias. Esta formulación de consorcios microbianos desarrollada hace poco se aplicó posteriormente para el compostaje de RFV a 25 t por capacidad de ventana con la adición de POME. Los consorcios microbianos introducidos son importantes para degradar la lignina y los componentes celulíticos durante la descomposición de RFV y POME. La formulación optimizada de estos se amplió con la operación de 40, 80 y 400 toneladas de capacidad. La bioconversión de RFV y POME en fertilizante orgánico se ilustra en la Figura 5.

Se analizaron y monitorearon los parámetros físicos, químicos y microbiológicos del compost. La relación C/N del compost de RFV frescos triturados por debajo de 30 se logró dentro de los 45 días del proceso de compostaje, con nitrógeno (N) > 1,8 %, fósforo (P) > 0,5 %, potasio (K) > 3,4 % y contenido de humedad < 50 %. La consistencia y estabilidad

del compost producido fueron validadas mediante el Examen Solvita.

4. Área de impacto 3A: conversión de nanocarbono y metano a hidrógeno

El área de impacto 3A implica el trabajo en la síntesis de catalizadores para la conversión de hidrógeno. El biogás compuesto de CO₂ y CH₄ es una fuente renovable atractiva para producir biohidrógeno. Este último es un portador de energía alternativa, que puede derivarse de la oxidación parcial¹⁰ y del reformado en seco y en vapor¹¹. Generalmente, el reformado de CH₄ con CO₂ y/o vapor emplea un sistema catalítico con el uso de un metal noble o metal de transición¹² como catalizador. Los catalizadores a base de metales nobles muestran un excelente rendimiento catalítico en los aspectos de conversión de alimentación y rendimiento de H₂. Sin embargo, su alto costo y disponibilidad restringen su plena aplicación en la reforma a mayor escala. El potencial de los metales de transición, como el níquel (Ni), el hierro (Fe) y el cobalto (Co) con actividad y rentabilidad relativamente altas, ha incitado a los estudios en el área de impacto 3A para ser aplicados en el reformado de CH₄ para convertir CH₄ a H₂.

Los metales de transición Ni, Fe y Co al 25 % de carga se incorporaron en MgAl₂O₄ para la síntesis de catalizadores Ni/MgAl₂O₄, Fe/MgAl₂O₄ y Co/MgAl₂O₄, a través del método de fusión de citrato impregnado recientemente desarrollado. Como se observó una mayor selectividad de Ni/MgAl₂O₄ para la conversión de CH₄ a H₂,¹³ el proceso de reformado se optimizó usando Ni/MgAl₂O₄ con la aplicación de la metodología de superficie de respuesta (RSM por sus siglas en inglés), que es una combinación de técnicas estadísticas y matemáticas. Se determinó que las condiciones operativas óptimas para el reformado de CH₄ en la conversión de CH₄ a H₂ son 697,65 °C para la temperatura de reacción, relación S:C de 2,42, relación CH₄:CO₂ de 1,92 y peso del catalizador de 2,30 g.

5. Área de impacto 3B: utilización de POME e hidrolizado de RFV para la producción de biohidrógeno

Se explotó la biomasa lignocelulósica del POME y la palma de aceite como sustratos para la producción de biohidrógeno en el área de impacto 3B. La igni-

Figura 5. La bioconversión de RFV y POME en fertilizante orgánico



ción de combustibles fósiles, principalmente carbón para generar energía produce altas emisiones de CO_2 a la atmósfera, que es uno de los principales contribuyentes al calentamiento global. El secuestro de carbono se utiliza para capturar y almacenar CO_2 , lo que permite el uso continuo de combustibles fósiles como la principal fuente de energía del mundo.

Sin embargo, el agotamiento de la oferta de combustibles fósiles y los estrictos controles hacia la liberación de GEI han acelerado la exploración de energías alternativas con GEI bajo/cero. Se informó que la energía generada por el H_2 es 2,75 veces superior a la de los combustibles fósiles convencionales.

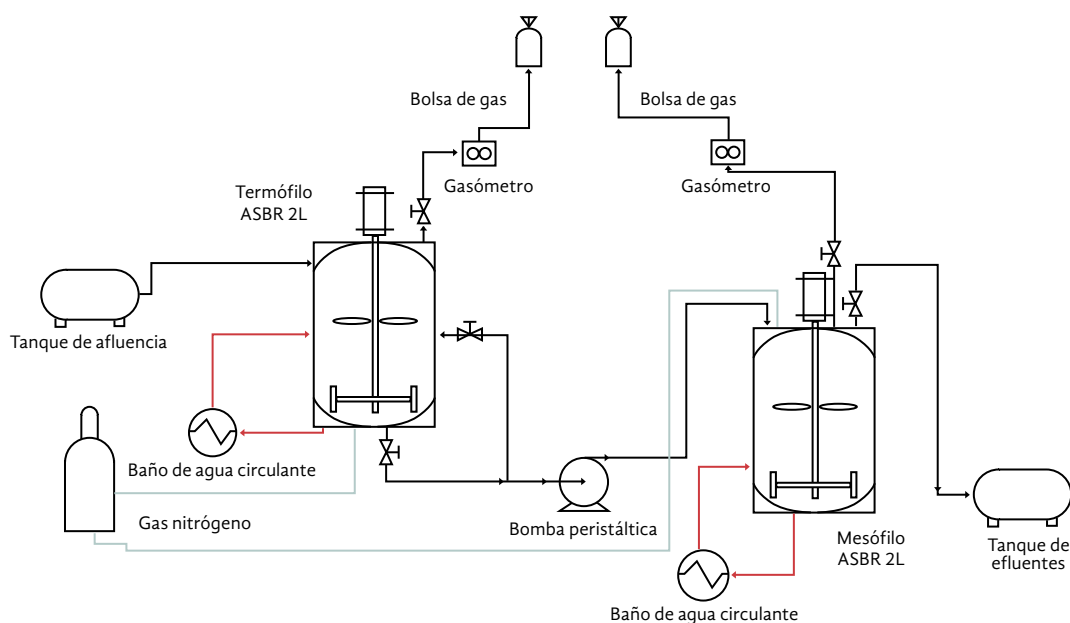
La producción de hidrógeno fermentativo a partir de materiales de desecho tiene un alto potencial para satisfacer las demandas de una población mundial cada vez mayor sin liberar ninguna sustancia nociva al medio ambiente¹⁴. Durante el proceso, las bacterias degradan los sustratos orgánicos y eliminan electrones adicionales para mantener la neutralidad iónica. Como resultado, las reacciones redox de las ferredoxinas producen hidrógeno molecular¹⁵. Los subproductos de la producción de aceite de palma tienen un enorme potencial en el campo de la energía renovable y la industria de la biorrefinería, como la producción de biohidrógeno. El concepto de producción

de biohidrógeno con el uso del POME e hidrolizado de RFV puede utilizarse como energía verde. Esto materializaría la tecnología de residuos cero.

Un enfoque tradicional de una sola etapa en la digestión anaeróbica solo produce CH_4 . Sin embargo, la digestión anaeróbica existente se improvisó en reactores anaeróbicos de cargas secuenciales (ASBR por sus siglas en inglés) de dos etapas. El primer reactor funciona en condición termófila ($55\text{ }^\circ\text{C}$), mientras que el segundo reactor (digestor metanogénico) está en condición mesófila ($37\text{ }^\circ\text{C}$). Esto da como resultado gas H_2 a través de una fermentación oscura de bajo costo¹⁵. La Figura 6 ilustra el diagrama esquemático del sistema de ASBR de dos etapas. La condición termófila es la condición óptima para la producción de biohidrógeno a partir de POME con alto rendimiento¹⁶.

El segundo sistema mesófilo se estableció cerca de la temperatura ambiente considerando el costo de calentamiento, especialmente al tener en cuenta la futura ampliación del proceso. La bacteria anaerobia en el reactor hidrogénico descompone los compuestos orgánicos en H_2 , que se cosecha antes de la acumulación de CH_4 . Esta técnica es vital para aumentar el rendimiento de H_2 mediante la eliminación de competidores, como los metanógenos durante la producción de biohidrógeno.

Figura 6: Diagrama esquemático de un sistema ASBR termófilo y mesófilo de dos etapas¹⁴



La mayor producción de biohidrógeno de 1,67 ± 0,02 de LH₂/LPOME se logró en la condición termófila con un pH inicial de 5,5, una concentración de azúcar inicial de 13,57 g/L y un tiempo de retención hidráulica (HRT por sus siglas en inglés) de 72 h. La fermentación de biohidrógeno a partir de biomasa localmente disponible (POME e hidrolizado de RFV) es una tecnología atractiva para la producción de bioenergía.

6. Área de impacto 4: pretratamiento de biomasa para la producción de biohidrógeno

La biomasa lignocelulósica (es decir, RFV) se trató previamente mediante reducción de tamaño, destrucción fisicoquímica e hidrólisis enzimática para producir azúcar fermentable en el área de impacto 4. Este último puede ser utilizado juntamente con POME en el área de impacto 3B para producir biohidrógeno. Los RFV contienen materiales poliméricos, tales como glucano (25-55 % en peso), hemicelulosa (25-50 % en peso) y lignina (15-30 % en peso). Tanto el glucano como la hemicelulosa del carbohidrato estructural que aporta la mayor porción en los RFV pueden despolimerizarse en intermedios de azúcar C5 y C6 de alto valor¹⁷.

Al principio, los RFV se molieron a un tamaño de 2 mm para deconstruir las fibras. Como tienen una estructura de lignina que reduce su digestibilidad durante la hidrólisis enzimática, se realizó un pretratamiento con amoníaco anhidro (PAA) con el fin de pretratar los RFV molidos para superar sus propiedades recalcitrantes¹⁸ y mejorar la eficiencia de la hidrólisis¹⁹. El PAA es un proceso de pretratamiento de seco a seco que solo consume una pequeña cantidad de disolvente (menos del 3 % de amoníaco anhidro) y no produce flujo de desechos líquidos, ya que el amoníaco se vaporiza fácilmente a temperatura ambiente. Durante el PAA, el amoníaco anhidro deconstruye y solubiliza la hemicelulosa y la lignina de los RFV molidos.

Antes de la hidrólisis enzimática de los RFV pretratados, se realizó un estudio de cóctel enzimático utilizando una combinación de diferentes especies enzimáticas: 1. Celluclast 1,5 L, Viscozyme L y Novozyme 188; 2. Ecozyme Cell y Novozyme 188; y 3. Cellic CTec2 y Cellic HTec2. Se ha determinado que el cóctel enzimático Cellic CTec2 y Cellic HTec2 tiene la mayor capacidad de hidrolizar los RFV decons-

truidos. La hidrólisis enzimática se optimizó aún más con el uso del cóctel enzimático Cellic CTec2 y Cellic HTec2 en una relación 1:1, cargando con 32,5 FPU/g de glucano a 50 °C de temperatura de hidrólisis, 150 rpm de velocidad de agitación y 48 h de tiempo de hidrólisis. El rendimiento de azúcar fermentable por peso seco de RFV de esta condición optimizada fue 83 % de glucano y 68 % de xilano.

7. Área de impacto 5: secuestro de dióxido de carbono y tratamiento de efluentes con algas

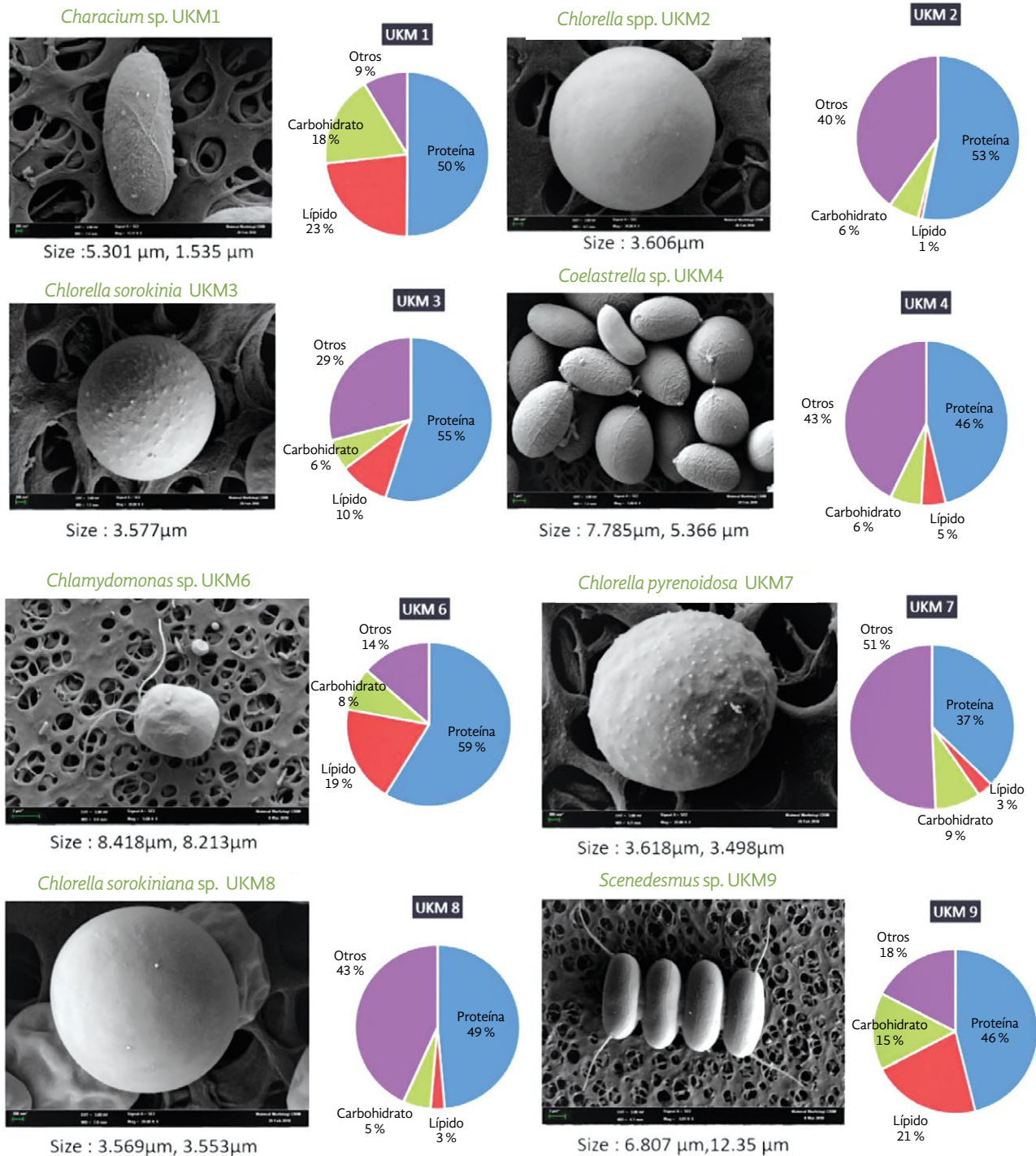
El trabajo de investigación bajo el área de impacto 5 integra el tratamiento con microalgas y el secuestro de CO₂ del POME recibido del digester anaeróbico del área de impacto 3B para la biorremediación de aguas residuales y el gas de combustión liberado del área de impacto 1 para la fijación de carbono. Se utilizaron microalgas como tratamiento biológico alternativo debido a su capacidad para reducir la emisión de CO₂ mediante la asimilación de este a través de la fotosíntesis²⁰. Las cepas de microalgas nativas se aislaron del estanque de tratamiento del POME en la planta de beneficio de aceite de palma y se analizaron para determinar su respuesta de crecimiento. El uso de algas aisladas localmente es significativo para evitar problemas de bioseguridad. La Figura 7 presenta las cepas de microalgas aisladas y sus composiciones de metabolitos en términos de contenido de proteínas, carbohidratos y lípidos.

Mediante la introducción de microalgas para el tratamiento del POME, la relación simbiótica positiva entre las microalgas y otros microorganismos, tales como bacterias, puede mejorar la reducción de contaminantes en este. *Scenedesmus sp.* (UKM9) es la cepa más eficiente en el tratamiento de POME con 58 %, 60 %, 50 % y 80 % de DQO, nitrógeno total, fósforo total y reducción de carbono orgánico total (COT), respectivamente. Por otro lado, *Chlorella spp.* (UKM2) es la cepa de microalgas más prometedora para el secuestro de CO₂. *Clorella spp.* (UKM2) podría tolerar una alta concentración de CO₂²¹ y capturar con éxito hasta 30 % en una sola pasada. Las condiciones operativas optimizadas para la mejor fijación de CO₂ y la reducción total de nitrógeno por esta cepa se lograron a una concentración de CO₂ de 10 % v/v, una tasa de aireación de 1.670 ml/min y una concentración de inóculo de 24,8 % v/v con fijación de CO₂ a 0,1.208 g de CO₂/L día y una reducción total

de nitrógeno de 80,9 %. Se desea una baja concentración de CO₂ para obtener una alta velocidad de disolución de gas en CO₂ en fase líquida disponible para la asimilación de microalgas y para estabilizar el pH de la suspensión²². Las microalgas asimilan los nu-

trientes del POME y el CO₂ del gas de escape. Al final del tratamiento, estos componentes se convierten en biomasa²³. La biomasa de algas maduras fue recolectada y se utilizó como potenciador de biofertilizantes para el área de impacto 2.

Figura 7. Cepas de microalgas aisladas y sus composiciones de metabolitos



8. Área de impacto 6: reciclaje y reutilización del agua

La tecnología de membrana integrada para el reciclaje y reutilización de agua en el área de impacto 6 es la etapa final del programa de investigación de residuos cero UKM-YSD para el tratamiento terciario de POME; con el objetivo principal de cumplir con las normas de agua de alimentación de calderas, para permitir el reciclaje y la reutilización de esta. El sistema de filtración de membrana integrado que se muestra en la Figura 8 consiste en un filtro de arena, una unidad de pretratamiento de carbón activado y un módulo de membrana de flujo cruzado utilizado para tratar adicionalmente el POME parcialmente tratado después del reactor de microalgas en el área de impacto 5²⁴. Los módulos de membrana utilizados en el sistema de filtración de membrana integrado fueron ósmosis inversa (OI), BW30²⁵; OI de baja presión, XLE²⁶; y membrana de nanofiltración (NF), NF270²⁷ comprada de DOW FILMTECTM.

La Tabla 1 resume el rendimiento del sistema de filtración de membrana integrada para diferentes módulos de membrana comerciales. Entre los módulos de esta membrana, el BW30 mostró el mayor rendimiento en la producción de permeado tratado que cumple con el estándar de alimentación de calderas para reciclaje y reutilización. El módulo de membrana BW30 para el tratamiento terciario de POME obtuvo la siguiente eficiencia de eliminación, es decir, 98,54 % de nitrógeno de amoníaco ($\text{NH}_3\text{-N}$); 99,93 % de DQO; 99,98 % de sólidos suspendidos totales (SST); 99,51 % de sólidos disueltos totales (SDT); 100 % color; 99,96 % fósforo; 99,81 % turbidez; 99,50 % conductividad; 55,62 % dureza, Mg; y 68,49 % dureza, Ca^{28,29}.

La Figura 9 muestra que mediante el uso de BW30 se obtuvo agua de permeado cristalina e inodora del sistema de filtración de membrana integrada. El POME tratado usando este sistema podría alimentarse en una caldera para el uso interno de la planta. Este resultado fue apoyado por un estudio realizado por

Figura 8. Sistema de filtración de membrana integrada²⁴

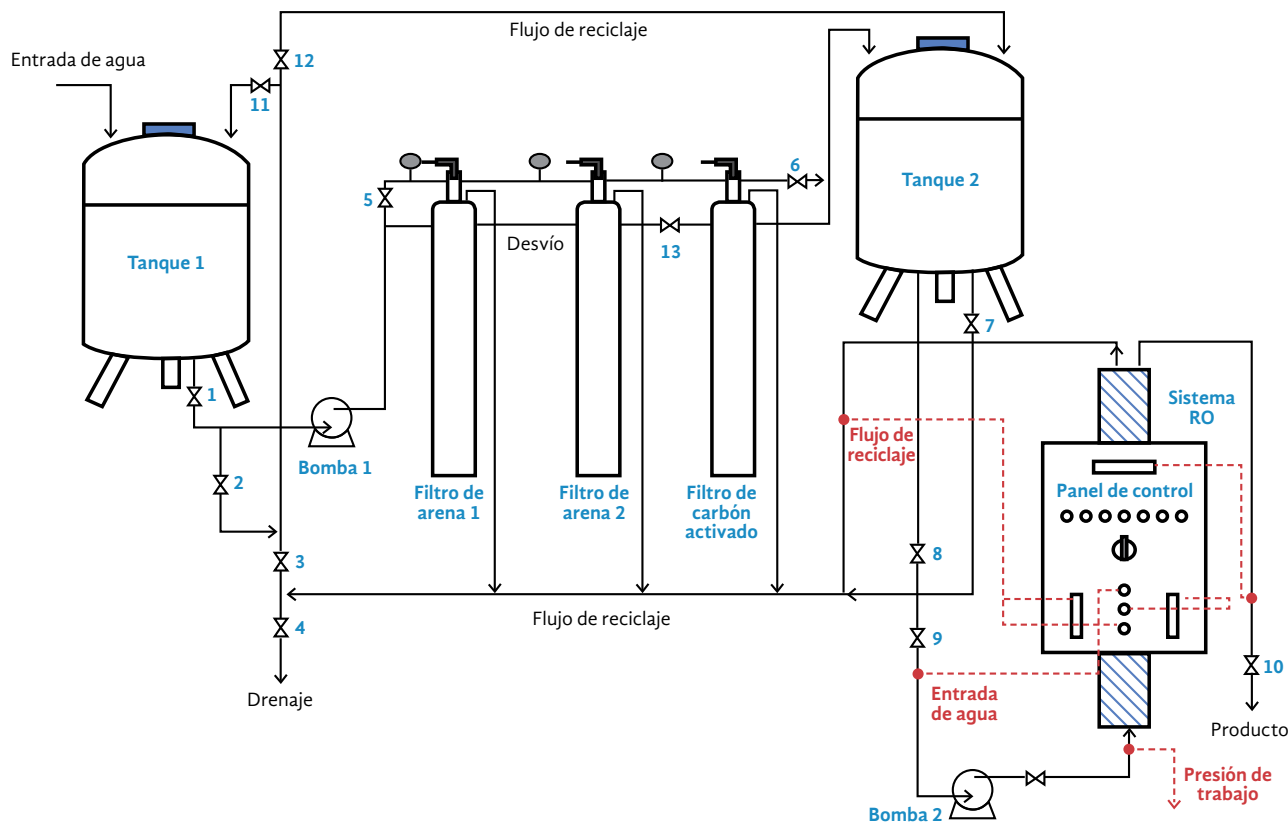


Tabla 1. Rendimiento del sistema de filtración de membrana integrada para diferentes módulos de membrana comerciales.

Parámetro	Solución de alimentación	BW30	NF270	XLE	Calidad del agua de alimentación de la caldera
NH ₃ -N (mg/L)	90,00	1,31	10,00	21,33	-
DQO(mg/L)	152,00	0,11	68,33	15,00	< 5
SST (mg/L)	170,00	0,04	8,89	5,56	< 10
SDT (mg/L)	5.436,67	26,63	1.660,00	293,00	< 100
Color (PtCo)	626,00	0,00	266,67	300,00	-
Fósforo (mg/L)	80,33	0,03	12,00	54,67	30-50
Turbidez (NTU)	46,90	0,09	1,74	2,74	0-3
Conductividad (μs)	10.590,00	53,40	3.376,67	578,67	-
pH	7,68	8,60	8,49	9,08	7-10
Dureza, Mg (mg/L)	447,67	198,67	279,67	108,60	< 500
Dureza, Ca (mg/L)	110,00	34,66	42,65	19,56	-

Ahmad *et al.*³⁰. El sistema de tratamiento de POME de dos etapas combinado con el proceso de pretratamiento y filtración por membrana había producido efluentes tratados de alta calidad que podrían utilizarse como agua de alimentación de calderas o agua potable. La planta de beneficio de aceite de palma requiere un gran volumen de vapor de agua con ex-

celente calidad para el suministro continuo a la línea de producción para mantener una alta eficiencia de su operación. Eventualmente, la alternativa de reutilizar el POME tratado y purificado del sistema de filtración de membrana integrada ayudaría a reducir el consumo total de agua y la cantidad de descarga de aguas residuales³¹.

Figura 9. Visualización de muestras de agua del tanque 1, tanque 2 y permeado (de izquierda a derecha)



9. Preparación de la tecnología para la comercialización

La tecnología de residuos cero desarrollada se demostró plenamente en una instalación a escala piloto instalada en la planta de beneficio de aceite de palma Sime Darby Tennamaram, Selangor Darul Ehsan, Malasia. Las Figuras 10 y 11 ilustran el diagrama esquemático y la fotografía de la instalación a escala piloto del proyecto de Tecnología de Residuos Cero UKM-YSD, respectivamente. Este programa de investigación de residuos cero promete una práctica de gestión sostenible alternativa en la industria de la palma de aceite.

Entre las siete áreas de impacto responsables bajo el proyecto de Tecnología de Residuos Cero UKM-YSD hay tres listas para la comercialización: áreas de impacto 2, 3B y 6. El de impacto 2 es el sistema de bioconversión para el compostaje conjunto de RFV y POME en biofertilizante. La optimización de este sistema es acelerar la descomposición y reducir la dependencia de fertilizantes inorgánicos. Como la producción de RFV es aproximadamente el 20 % de los RFF utilizados en los procesos de molienda para la extracción de aceite, es aplicable o puede ampliarse aún más para una operación a gran escala con gastos de capital (CAPEX), gastos operativos (OPEX) y un costo de producción de RM 6,96 millones, RM 1,9 millones/año y RM 33/tonelada métrica, respectivamente.

Después, el área de impacto 3B es un sistema de fermentación anaeróbica de dos etapas que utiliza POME y biomasa para la producción de biohidrógeno y biometano. La producción de biohidrógeno se puede combinar con la infraestructura de biogás existente para producir biocombustible verde y sostenible, que es limpio y elimina las emisiones de CO₂ en comparación con los combustibles de hidrocarburos de uso común. El sistema puede comercializarse debido al alto potencial de los combustibles alternativos o las fuentes de energía que pueden ofrecer una solución respetuosa con el clima para una crisis energética. El CAPEX se estimó en alrededor de RM 10-14 millones, mientras que el OPEX es de aproximadamente RM 0,25-0,35 millones/año.

Finalmente, el área de impacto 6 es responsable del reciclaje y reutilización de agua por parte del sistema de filtración de membrana integrada. El sistema integrado para el tratamiento y purificación del agua reduce la huella hídrica al reciclar y reutilizarla para lograr cero efluentes dentro de la planta. También puede reducir los costos operativos, ya que se disminuyen las fuentes de agua externas. Con base en el análisis económico tecnológico de este sistema que está listo para ser comercializado, el CAPEX, OPEX y el costo de producción son RM 2,34 millones, RM 0,3 millones/año y RM 2,06/tonelada de permeado, respectivamente.

Figura 10. Diagrama esquemático de la instalación a escala piloto

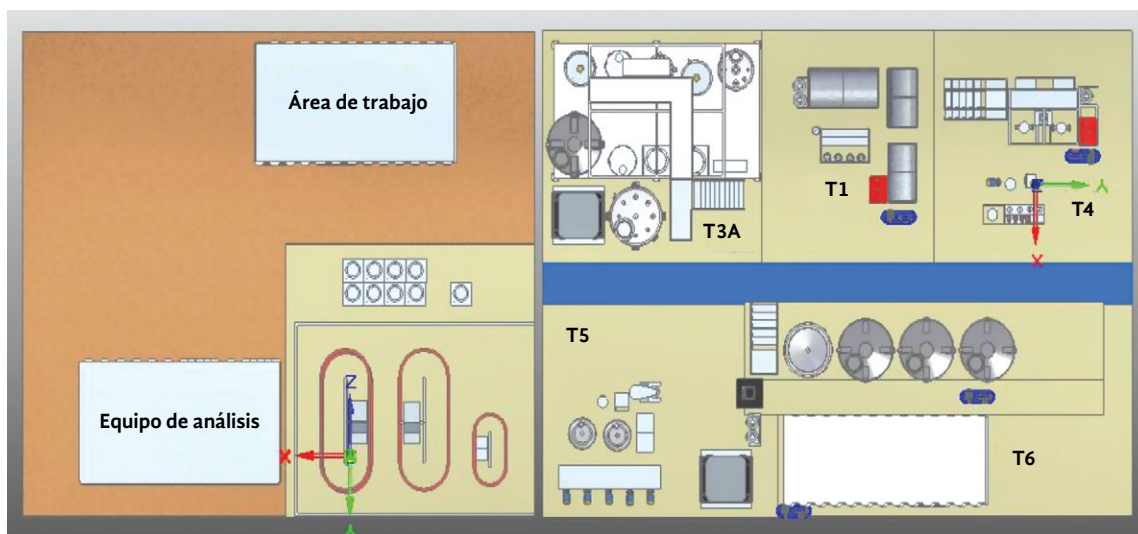


Figura 11.
Fotografía de
la instalación a
escala piloto



Conclusión

Aunque el proyecto de Tecnología de Residuos Cero UKM-YSD se centró en los POME, la investigación realizada por pequeñas y medianas empresas es más exhaustiva y variada. La planta piloto de residuos cero UKM-YSD sirve como tecnología pionera con la posibilidad de cambiar las percepciones, especialmente entre los importadores extranjeros, y mostrar que la producción de aceite de palma puede ser respetuosa con el medio ambiente

Este programa de investigación de cero residuos junto con la producción de biogás, biofertilizante y

agua reciclada sugiere una buena práctica de gestión sostenible alternativa en la industria del aceite de palma, que está alineada con el principio de la Mesa Redonda sobre Aceite de Palma Sostenible (RSPO por sus siglas en inglés) sobre responsabilidad ambiental y conservación de los recursos naturales y la biodiversidad.

Reconocimientos

Los autores desean agradecer la financiación para este trabajo de Yayasan Sime Darby y Sime Darby Research (PKT 6/2012).

Referencias

1. MPOC (2020) Nearly 1M work in oil palm industry. Recuperado de <http://mpoc.org.my/nearly-1m-work-in-oil-palm-industry/>
2. The Institution of Engineers, Malaysia (IEM) (2019) Zero waste palm oil processing: An industry-university initiative. Jurutera, Agosto 2019, pág. 32.
3. Sajjad, A-A., Teow, Y.H., Mohammad, A.W. (2018) Sustainable approach of recycling palm oil mill effluent (POME) using integrated biofilm/membrane filtration system for internal plant usage. *Jurnal Teknologi* 80(4): 165-172.
4. Ghani, M.S.H. (2019) Pre-treatment, fouling behaviour, and cleaning property of membranes applied for tertiary palm oil mill effluent treatment. Master Degree Dissertation, Universiti Kebangsaan Malaysia.

5. Roundtable on Sustainable Palm Oil (2009) Greenhouse gas emissions from palm oil production: Literature review and proposals from the RSPO working group on greenhouse gases. Final report, págs. 1-48.
6. Ramírez-Moreno, M.J., Romero-Ibarra, I.C., Landeros, J.O., Pfeiffer, H. (2013) Alkaline and alkaline-earth ceramic oxides for CO₂ capture, separation, and subsequent catalytic chemical conversion. CO₂ Sequestration and Valorization ed CdRV Morgado and V Paulo 403-442.
7. Wu, S.Y., Hsiao, I.C., Liu, C.M., Mt Yusuf, N.Y., Wan Ishak, W.N.R., Masdar, M.S. (2017) A novel bio-cellulose membrane and modified adsorption approach in CO₂/H₂ separation technique for PEM fuel cell applications. International Journal of Hydrogen Energy 42(45):27630-27640.
8. Sidek M.Z., Cheah, Y.J., Zulkefli, N.N., Yusuf, N.Y.M., Isahak W.N.R.W., Sitanggang, R., Masdar, M.S. (2019) Effect of impregnated activated carbon on carbon dioxide adsorption performance for biohydrogen purification. Materials Research Express 6:1-15.
9. Ru, F.Y., Zulkefli, N.N., Mt Yusuf, N.Y., Masdar, M.S. (2018) Effect of operating parameter on H₂/CO₂ gas separation using electrochemical cell. International Journal of Applied Engineering Research 13(1): 505-510.
10. Wang, F., Li, W.Z., Lin, J.D., Chen, Z.Q., Wang, Y. (2018) Crucial support effect on the durability of Pt/MgAl₂O₄ for partial oxidation of methane to syngas. Applied Catalysis B: Environmental 231:292-298.
11. Álvarez M.A., Centeno, M.Á., Odriozola, J.A. (2016) Ru-Ni Catalyst in the combined dry-steam reforming of methane: The importance in the metal order addition. Topics in Catalysis 59(2-4): 303-313.
12. Turchetti, L., Murmura, M.A., Monteleone, G., Lemonidou, A.A., Angeli, S.D., Palma, V., Ruocco, C., Annesini, M.C. (2016) Kinetic assessment of Ni-based catalysts in low-temperature methane/biogas steam reforming. International Journal of Hydrogen Energy 41(38): 16865-16877.
13. Pudukudy, M. Yaakob, Z., Takriff, M.S. (2015) Methane decomposition over Pd promoted Ni/MgAl₂O₄ catalysts for the production of CO_x free hydrogen and multiwalled carbon nanotubes. Applied Surface Science 356:1320-1326.
14. Maaroff, R.M., Jahim, J.M., Azahar, A.M., Abdul, P.M., Masdar, M.S., Nordin, D., Abd Nasir, M.A. (2019) Biohydrogen production from palm oil mill effluent (POME) by two stage anaerobic sequencing batch reactor (ASBR) system for better utilization of carbon sources in POME. International Journal of Hydrogen Energy 44: 3395-3406.
15. Das, D., Veziroglu, T.N. (2008) Advances in biological hydrogen production processes. International Journal of Hydrogen Energy 33: 6046-6057.
16. Zainal, B.S., Zinatizadeh, A.A., Chyuan, O.H., Mohd, N.S., Ibrahim, S. (2018) Effects of process, operational and environmental variables on biohydrogen production using palm oil mill effluent.
17. Abdul Rahman, N.F., Harun, S., Sajab, M.S., Zubairi, S.I., Markom, M.M., Jahim, J.M., Mohd Nor, M.T., Abdullah, M.A., Hashim, N. (2018) Boosting enzymatic hydrolysis of pressurized ammonium hydroxide pretreated empty fruit bunch using response surface methodology. Journal of Engineering Science and Technology 13(8): 2421-2445.

18. Marlowe, A.S. (2014) Enzyme optimization for lignocellulose hydrolysis using mechanistic modelling. Master Thesis. Department of Chemical Engineering, Michigan Technological University, Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM16) 1-15. Michigan, United States of America.
19. Shamsudin, S., Mohd Shah, U.K., Zainudin, H., Abd-Aziz, S., Mustafa Kamal, S.M., Shirai, Y., Ali Hassan, M. (2011) Effect of steam pretreatment on oil palm empty fruit bunch for the production of sugars. *Biomass and Bioenergy* 36: 280-288.
20. Cuellar-Franca, R.M., Azapagic, A. (2015) Carbon capture, storage, and utilization technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO₂ Utilization* 9: 82-102.
21. Kastanek, F., Sabata, S., Solcova, O., Maletterova, Y., Kastanek, P., Branyikova, I., Kuthan, K., Zachleder, V. (2010) In-field experimental verification of cultivation of microalgae *Chlorella sp.* using the flue gas from a cogeneration unit as a source of carbon dioxide. *Waste Management Resource* 28: 961-966.
22. Hariz, H.B., Takriff, M.S., Ba-Abbad, M.M., Mohd Yasin, N.H., Mohd Hakim, N.I.N. (2018) CO₂ fixation capability of *Chlorella sp.* And its use in treating agricultural wastewater. *Journal of Applied Physiology* 30: 3017-3027.
23. Hariz, H.B., Takriff, M.S. (2017) Palm oil mill effluent treatment and CO₂ sequestration by using microalgae-sustainable strategies for environmental protection. *Environmental Science and Pollution Research* 24: 20209-20240.
24. Teow, Y.H., Mohammad, A.W., Wan Mohammad Hamdan, W.N.A., Ghani, M.S.H., Ngteni, R., Mohamed Yusof, K.M. (2016) Pilot-scale integrated pretreatment/membrane filtration system for aerobic palm oil mill effluent (POME) treatment. The 2016 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM16) 1-15.
25. <https://www.lenntech.com/replacement/filmt--ec-bw30-4040.htm>
26. <https://www.lenntech.com/products/Filmtec-Membranes/154546/XLE-4040/index.html>
27. <https://www.lenntech.com/products/Filmtec-Membranes/149987/NF270-4040/index.html>
28. Teow, Y.H., Ghani, M.S.H., Mohammad, A.W. (2018) Physical and chemical cleaning for nanofiltration/reverse osmosis (NF/RO) membranes in treatment of tertiary palm oil mill effluent (POME) for water reclamation. *Jurnal Kejuruteraan SI* 1(4): 51-58.
29. Ghani, M.S.H., Teow, Y.H., Ang, W.L., Mohammad, A.W., Ngteni, R., Mohamed Yusof, K.M. (2017) Fouling assessment of tertiary palm oil mill effluent (POME) membrane treatment for water reclamation. *Water Reuse and Desalination* 8(3): 412-423.
30. Ahmad, A.L., Ismail, S., Bhatia, S. (2003) Water recycling from palm oil mill effluent (POME) using membrane technology. *Desalination* 157(1-3): 87-95.
31. Mavrov, V., Belieres, E. (2000) Reduction of water consumption and wastewater quantities in the food industry by water recycling using membrane processes. *Desalination* 131(1-3): 75-86.