

# Biocombustibles de segunda generación de la biomasa de palma de aceite\*

## Second Generation Biofuels from Oil Palm Biomass

**CITACIÓN:** Soh, L. (2016). Biocombustibles de segunda generación de la biomasa de palma de aceite. *Palmas*, 37(Especial Tomo II), pp. 137-148.

**PALABRAS CLAVE:** biomasa lignocelulósica, características energéticas, energía renovable y sostenible, valorización de la biomasa.

**KEYWORDS:** Lignocellulosic biomass, energy characteristics, renewable and sustainable energy recovery from biomass.

\*Artículo original recibido en inglés y traducido por Strong Tower Consulting.



**LOH SOH KHEANG**

Directora de Energía y Medio Ambiente, MPOB (Mesa de Palma de Aceite de Malasia) Head of Energy & Environment Unit, MPOB  
lohsk@mpob.gov.my

## Resumen

El aumento en la demanda energética a nivel mundial y las reservas menguantes de combustibles fósiles han impulsado el desarrollo de la energía sostenible usando recursos renovables. La energía renovable (ER) se presenta con frecuencia como una solución potencial para abordar aspectos como la mejora de la seguridad energética, combatir el cambio climático y promover el desarrollo agrícola y rural. Esto ha atraído un interés global masivo encaminado hacia la valorización de la biomasa para la producción de ER. Se estima que la industria de aceite de palma de Malasia genera 80 millones de toneladas de biomasa seca de palma de aceite al año – en las formas de racimo de fruta vacío (RFV), cuesco, fibra de mesocarpio, hoja y estípote de palma de aceite, con un recurso no explotado, con un alto potencial como ER. La proliferación de tecnologías nuevas o mejoradas en el país está abriendo el camino para la implementación exitosa de plantas de biocombustibles de demostración de segunda generación. Este estudio trata las importantes características energéticas que posee la biomasa de

palma de aceite, la eficiencia de la conversión de energía y los resultados energéticos potenciales de las tecnologías que han sido explotadas en el despliegue de biocombustibles de biomasa de palma de aceite de segunda generación. Se hace una comparación entre el desarrollo, los desafíos y las oportunidades para el despliegue de biocombustibles de segunda generación, provenientes de biomasa de palma de aceite en Malasia y aquellos del desarrollo tecnológico global, además de los requisitos de inversión necesarios para establecer plantas de producción de segunda generación.

## Abstract

The increase in energy demand worldwide and diminishing fossil fuel reserves have driven the development of sustainable energy from renewable sources. Renewable energy (RE) is often portrayed as a potential solution to address issues such as enhancing energy security, combating climate change, and promoting agriculture and rural development. This has attracted vast global interest gearing towards biomass valorization for RE production. The Malaysian palm oil industry generates yearly estimated 80 million dry tons of oil palm biomass - in the forms of empty fruit bunch (EFB), palm shell, mesocarp fibre, oil palm frond and oil palm trunk - as untapped resource highly potential as RE. The mushrooming of new or improved technologies in the country is paving the way to the success implementation of second generation biofuels demonstration plants. This paper discusses the important energy characteristics of oil palm biomass, the energy conversion efficiency and potential energy outputs of the exploited technologies, in second generation biofuel deployment from oil palm biomass. The development, challenges and opportunities for the development of second generation biofuels from oil palm biomass in Malaysia are benchmarked against that in the global technological development and investment requirement to establish second generation production plants.

□

## Introducción

Los biocombustibles de segunda generación pueden ser producidos a partir de diversas materias primas de tipo biomasa, incluyendo la biomasa leñosa y la no leñosa; en resumen, de materiales lignocelulósicos. Los biocombustibles de segunda generación se pueden dividir en: 1) de biomasa a sólido (BTS, del inglés Biomass to Solid), mediante un proceso mecánico-térmico, 2) de biomasa a líquido (BTL, del inglés Biomass to Liquid), a través de procesos térmicos, químicos y biológicos, y 3) de biomasa a gas, (BTG, del inglés Biomass to Gas), a través de procesos térmicos y biológicos (Loh y Choo, 2013). Mientras que los pellets y las briquetas son BTS, el bioetanol, el bioaceite o diésel sintético están en forma líquida, y el gas de síntesis (syngas) y el biogás son ejemplos de BTG.

Mundialmente, el desarrollo de los biocombustibles de segunda generación ha progresado hasta llegar

a una escala piloto o de demostración. Hasta ahora solo dos plantas comerciales de bioetanol de segunda generación y una de bioaceite están en operación, y el resto están en distintas etapas de desarrollo. Por ejemplo, una planta de bioetanol que emplea biomasa celulósica se está construyendo en Hugoton, Kansas, Estados Unidos, por Abengoa (Tabla 1), mientras que unas plantas de bioaceite por pirólisis, en Hengelo, Países Bajos, y en Toscana, Italia, por BTG BioLiquids y Envergent (UOP-Ensyn), están aún en diversas etapas de operación comercial (Tabla 2). La instalación de la mayoría de estas plantas implica grandes inversiones.

En Malasia hay actualmente en demostración una planta de bioetanol que produce 1,25 t/día (MES, 2010), mientras que la planta en demostración de bioaceite de 5 t/día construida en 2012 no está ahora en funcionamiento (comentario personal). Aunque el

Área Económica Nacional Clave de Malasia (NKEA, del inglés National Key Economic Area) que pertenece al Programa de Transformación de la Economía (ETP, del inglés Economic Transformation Programme), una colaboración entre VO Honeywell, un gigante de la palma aceitera local, y FELDA (del inglés Federal Land Development Authority), formalizó la construcción de una planta de biocombustible con capacidad de 150 t/día, hasta ahora la planta no se ha hecho realidad (Pemandu, 2011; com. pers.)

La cantidad de biomasa usada en el bioetanol de segunda generación y en la producción de bioaceite puede

ser enorme, siendo superior a 300.000 t/año y a veces no está fácilmente disponible, teniendo en cuenta el tamaño de la planta. Los productos bioetanol, biogás, energía eléctrica renovable, biofertilizantes, biocombustible sólido, deben ser totalmente aprovechados y utilizados. Para tener economía de escala se requiere adoptar algún concepto de biorrefinería, para incluir la integración eficiente de la energía calórica, el reciclaje de agua y la recuperación de coproductos y su uso (por ejemplo, la combinación de calor y energía (CHP, del inglés Combined Heat and Power), que hacen que el proceso completo sea eficiente y económico. Como se requirió

**Tabla 1.** Estado de biorrefinerías comerciales de biomasa lignocelulósica.

Ubicación/ empresa	Tecnología	Materias primas	Capacidad de producción (mil galones /año)	Costo Proyecto/planta (mil /USD)	Progreso
Beta Renewables - Novazyme - Inbicon / Crescentino, Italia	Pretratamiento - high T & P, Integrated Enzymes & PROESA Eng. Tech.	Cascarilla de trigo, cascarilla de arroz, bagazo, maíz, rastrojo, etc. Uso de biomasa: 270.000 t/año	13-20 (50 mil L) 13 MW electricidad	159 (proyecto)	Operacional, oct. 2013
Abengoa Bioenergy / Hugoton, Kansas, EE. UU.	Enzimática - A la medida Hidrólisis enzimática	Biomasa multicelulósica residuo de cosecha y fibra vegetal	25 20 MW Electricidad	685 (planta)	Construcción prevista terminar dic. 2013
Inbicon - DONG Energy - Novozymes / Maabjerg, Dinamarca	Acondicionamiento mecánico pretratamiento hidrotérmico e hidrólisis enzimática.	Cascarilla de trigo (50 t/hr)	13-20	390 - 580 (planta)	Finalización prevista 2016
logen - Raízen Energía / Piracicaba, São Paulo	Explosión de vapor - hidrólisis de separación & fermentación avanzada	Bagazo & Cascarilla de caña (completamente integrada dentro del etanol de primera generación)	~13	100 (planta)	Puesta en marcha cuarto trimestre 2014
Mascoma - Frontier Renewable - Valero Energy / Kinross, Michigan, EE. UU.	Bioprocesamiento consolidado - Una levadura genéticamente modificada	Celulosa y viruta de madera	20	232 Construcción, puesta en marcha y puesta en servicio de las instalaciones	Finalización prevista 2014/15
Mitsui (MES) - Inbicon/Dong-Teck Guan	Pretratamiento hidrotérmico (vapor) e hidrólisis enzimática	Racimos de fruta vacíos de palma de aceite (EFB)	1.25 t/día	€10 (CAPEX)	Operacional, 2013

**Tabla 2.** Estado de plantas comerciales de bioaceite de biomasa lignocelulósica.

Ubicación/ empresa	Tecnología	Materias primas	Capacidad de producción (miles de galones /año)	Costo (USD, miles)	Estado
Dynamotive, Guelph, Ontario, Canadá	Pirólisis rápida Reactor de lecho fluidizado	Virutas de madera	200	8.8	Operacional 2007
BTG BioLiquids, Hengelo, Países Bajos	Pirólisis Flash "biorrefinería" Reactor de cono giratorio	Residuos madereros	120	-	Finalización prevista 2014
Envergent (UOP-Ensyn) Industria e Innovazione, Tuscany, Italia	Tecnología de procesamiento térmico rápido (RTP, del inglés Rapid Thermal Processing Technology)	Residuos mezclados de bosque de pino y madera de demoliciones	150	-	Finalización prevista dic. 2013
Envergent (UOP-Ensyn) Tolko Industries, Alberta, Canadá	RTP	Viruta y residuos madereros	400 (22.5 mil galones/año)	14.3	Prevista terminar dic. 2014
Envergent (UOP-Ensyn) Felda Sahabat, Sabah	RTP	Palma y residuos de bagazo	400 150	82 45	Ninguna fecha disponible
Palm Oligo Sdn Bhd (POSB) - Lipochem (M) Sdn Bhd, Jalan Kapar, Klang Malasia	Pirólisis acelerada con catalizador (zeolite)	Torta de palmiste	5	~1	Operacional julio de 2012

una enorme inversión, la primera planta fue financiada principalmente por una empresa petrolera gigante y apoyada por el gobierno. En el futuro la tendencia en la bioenergía es integrar todas las formas de energía producida, por ejemplo, de biogás a hidrógeno renovable u otra energía renovable (ER), o en combustibles terminados, llamados biocombustibles celulósicos de tipo drop-in, en las unidades de hidrogenación de las refinerías seleccionadas. Esto va a resolver muchos aspectos relativos a la calidad y el cumplimiento de los estándares. También significa una mayor viabilidad en el desarrollo de los biocombustibles de segunda generación, en donde se debe maximizar la integración de los productos y la recuperación de los recursos.

A nivel mundial, la mayoría de las plantas productoras de pellets leñosos están lideradas por Europa y América del Norte (Voegelé, 2014) enfoca-

das en satisfacer la demanda de combustión industrial en pequeña escala, o para uso doméstico. Las muestras de biomasa y los tamaños de las plantas de producción de pellets pueden ser más pequeños y el costo de inversión es menor también. En Malasia hay en la actualidad aproximadamente siete plantas de pellets con capacidades de producción que van desde 2 hasta 6 t/hr, y utilizan EFB como materia prima. La producción oscila entre 10.000 y 25.000 t de pellets de palma al año (Tabla 3).

## El potencial de biomasa en Malasia

La biomasa más abundante disponible en Malasia es la biomasa de palma de aceite, en forma de racimos de fruta vacíos (EFB), fibras del mesocarpio de la palma, cuesco y efluente de las plantas de be-

neficio de aceite de palma (POME, del inglés Palm Oil Mill Effluent). Otros recursos que se producen localmente y que pueden ser explotados son los residuos forestales (residuos de madera), los residuos sólidos urbanos (MSW, del inglés Municipal Solid Waste), los residuos de la agricultura (cascarilla de arroz, etc.), cultivos energéticos (jatropha, algas) y otros recursos no basados en la biomasa, como la energía hidráulica, solar, eólica y geotérmica (Loh y Choo, 2013, KeTTHA, 2010).

El aceite de palma es un cultivo de oro, ya que produce no solo el aceite (solamente cerca de 10 %) como fuente de alimento, sino que el restante 90 % (Basiron y Chan, 2004, Loh y Choo, 2013) es una valiosa biomasa lignocelulósica útil para muchas aplicaciones diferentes. El árbol comienza a dar frutos a los tres años y tiene una vida económica de 25 años antes de la tala, para su reforestación. Los racimos de fruta fresca (FFB, del inglés Fresh Fruit Bunches) son cosechados y transportados a los molinos de aceite de palma para la extracción de aceite, mientras que los tallos de la palma de aceite, las hojas de la palma y el estípote de la palma de aceite (OPT) quedan disponibles durante la poda y reforestación. Después de exprimir el aceite con la prensa mecánica, el EFB que se deja sin utilizar se apila y queda desaprovechado en los molinos. Normalmente

se trata como combustible de caldera, o se muele en las plantaciones. El aceite de palma proviene del mesocarpio y el aceite de palmiste se extrae del núcleo de la palma. Los subproductos después de la extracción del aceite de palma son el EFB, las fibras del mesocarpio, el cuesco y la torta de palmiste.

Por cada tonelada de FFB procesada en la planta de beneficio se generan residuos sólidos de alrededor de 5,5 % del cuesco de palma, 13,5 % de las fibras del mesocarpio y, 22 % del EFB (Ma *et al.*, 1994, Chan, 1999, Kong *et al.*, 2014). En total, esto se traduce en cerca de 80 mil t anuales de biomasa sólida de palma de aceite (con base en el peso seco), y 64 mil t anuales de residuos líquidos (POME), del proceso de la planta de beneficio de aceite de palma (Tabla 4).

La biomasa de palma de aceite puede ser un fertilizante muy valioso, así como una fuente para producción de energía (Gurmit, 1994, Chan, 1999, Ravi Menon *et al.*, 2003, Yusoff, 2006, Sumathi *et al.*, 2008, Loh y Choo, 2013). Esto se debe a que tiene muy buenos nutrientes en su contenido (NPK indica la relación entre los elementos nitrógeno, fósforo y potasio), así como propiedades de combustible, por ejemplo, alrededor de 134 kg/ha/año de N, 14 kg/ha/año de P y 210 kg/ha/año de K (Tabla 5), quedan disponibles

**Tabla 3.** Estado de plantas comerciales de biocombustible sólido en Malasia.

Ubicación/ empresa	Tecnología	Materia prima	Capacidad de producción (t/hr)	Costo Proyecto/planta (RM, mil)	Progreso
Detik Aturan Sdn. Bhd (Kuala Selangor, Selangor)	Troquel de anillo	Racimo de fruta vacío (EFB)	6	1,5-2,0 / t pellet de palma (costo de producción)	En operación, oct. 2011
Felda Palm Industries Sdn. Bhd ( KKS Semenhu, Kota Tinggi)	Troquel de anillo	EFB	4 (24.000 t/año)	6,5	Terminada 2011 En funcionamiento
QL Tawau Palm Pellet Sdn. Bhd. (QL Palm Oil Mill 1, Tawau)	Troquel plano	EFB	4 (25.000 t/año)	12,5 (incluyendo consultorías civiles, de construcción y eléctricas)	Terminada 2011
Global Green Synergy-Malaysian Palm Oil Board Mambau, Negeri Sembilan	Pretratamiento para producir pellets de baja ceniza, troquel de anillo	EFB	2 (9.600 t/año)	1,3	En funcionamiento 2014

**Tabla 4.** Disponibilidad de biomasa de aceite de palma en 2014 en Malasia.

No.	Tipo de biomasa de aceite de palma	Cantidad (miles de toneladas)		
		Peso mojado	Peso seco	
1.	Hoja de la palma aceite de (OPF) (de la actividad de poda) OPF (de actividad de reforestación)	-	42,06 3,03	22,5 (disponible)
2.	Estípite de la palma de aceite (reforestación de 209.200 ha*)	-	15,58	
3.	Racimo de fruta vacío (443 Planta de beneficio de aceite de palma, racimos de fruta fresca (FFB) procesada = 95,38 mil t) (22 % de FFB)	20,98	7,34	
4.	Fibras del mesocarpio (13,5 % de FFB)	12,87	7,72	
5.	Cuesco (5,5 % de FFB)	5,24	4,46	
TOTAL			80,19	
6.	Efluente de las plantas de beneficio de aceite de palma (POME) (~67 % de FFB)	63,90 (1789 mil m <sup>3</sup> biogás)	3,18**	

Nota: \*con base en 4 % de la tasa de replantación en 2013, \*\* con base en 5 % de los sólidos en POME (base seca).

**Tabla 5.** Valor de abono de la biomasa de aceite de palma.

Partes de la palma	N	P	K	Mg	Ca
	kg/ha/año				
Hojas (poda anual)	107,9	10,0	139,4	17,2	25,6
Racimos de fruta vacíos	5,4	0,4	35,3	2,7	2,3
Fibra del mesocarpio	5,2	1,3	7,6	2,0	1,8
Cuesco	3,0	0,1	0,8	0,2	0,2
Efluente de las plantas de beneficio de la palma de aceite (crudo)	12,9	2,1	26,6	4,7	5,4
Total	134,4	13,9	209,7	26,8	35,3

como producto de toda la biomasa del aceite de palma, provenientes del campo y de la planta de beneficio (Khalid, 1999, Chan *et al.*, 1981). Como cualquier biocombustible y antes de utilizarlos como fuente de energía, el poder calorífico (cv, del inglés Calorific Value) y el material volátil de la biomasa de la palma de aceite deben ser tan altos como sea posible, mientras que el contenido de humedad, la ceniza y el cloruro, deben reducirse al máximo (Tabla 6).

La biomasa de la palma de aceite está conformada por celulosa, hemicelulosa, lignina y ceniza (Loh y Choo, 2013). En lo referente a la aplicación de la energía, la biomasa de la palma de aceite es alta en holocelulosas (Tabla 7), -xilosa, arabinosa, galactosa, manosa, monómeros de glucosa- lo cual la convierte en combustible líquido. Por otro lado, la lignina, que se entrelaza con una variedad de diferentes uniones químicas para proporcionar la resistencia mecáni-

**Tabla 6.** Propiedades combustibles de la biomasa de la palma de aceite.

Muestra de biomasa de palma de aceite	Poder calorífico (CV) promedio (MJ/kg)	Contenido de humedad (%)	Contenido de ceniza (%)	Contenido de materias volátiles (%)
Racimos de fruta vacíos	18,88	66 - 69	4,60	87,0
Fibra del mesocarpio	19,06	35 - 48	6,10	84,9
Cuesco	20,09	11 - 13	3,00	83,4
Hojas de la palma de aceite	15,72	62 - 77	3,37	85,1
Palmiste	17,47	67 - 81	3,35	86,7
Efluente de las plantas de beneficio	16,99	90 - 95	15,20	77,0

Fuente: Loh *et al.*, 2012.

**Tabla 7.** Composición química en la biomasa de la palma de aceite.

Composición química	Racimos de fruta vacíos (EFB)	Estípote de la palma de aceite (OPT)	Hoja de palma aceite (OPF)	Cuesco de palma
Lignina	19,67 ± 6,80	20,51 ± 4,01	20,50 ± 2,20	50,7
Holocelulosa	78,00 ± 8,70	75,00 ± 5,02	80,33 ± 3,18	43,5
α-celulosa	46,17 ± 11,17	42,32 ± 5,18	40,10 ± 9,70	20,8
Hemicelulosa	32,30 ± 7,82	32,35 ± 1,65	37,05 ± 3,35	22,7
Ceniza	3,2 ± 2,31	1,6 ± 0,35	3,28 ± 0,87	4,44

Fuente: Abdullah *et al.*, (2010), Loh y Choo (2013).

ca de las paredes celulares, no se hidroliza y degrada fácilmente, lo cual contribuye al carbonizado de los contenidos sólidos, durante la producción de los biocombustibles. De ahí que el cuesco es uno de los mejores candidatos de la biomasa de palma de aceite para la producción de biocarbón y biocombustible sólido; los restantes se pueden utilizar para la conversión de biocombustibles líquidos. La biomasa de la palma de aceite es alta en C y O, lo que se traduce en altas proporciones de C/H y O/H, que a su vez determinan la calidad de un combustible. Su contenido de N y S son muy pequeños o nulos, y cuando se queman, emiten poco o ningún NOx y SOx. Por tanto, es más ecológico como combustible.

Actualmente, además de la conversión de biomasa de aceite de palma en ER, también es importante explorar los medios para utilizar la biomasa en muchas otras áreas; entre otras, biofertilizantes altamente desa-

rollados (abono y compost), materiales biocompuestos (madera contrachapada, tableros aglomerados de densidad media, carbón activado, etc.) (Abdul Aziz *et al.*, 2008, Ibrahim *et al.*, 2011, Mokhtar *et al.*, 2011) y la más reciente aplicación bioquímica (azúcares, lignina, fitonutrientes) (Zhang *et al.*, 2012, Shen *et al.*, 2014).

## Panorama de los biocombustibles de segunda generación obtenidos de la biomasa de palma de aceite

Hay un potencial de energía sin explotar proveniente de la biomasa del aceite de palma (EFB, cuesco, fibra del mesocarpio, etc.), ya sea como BTS, BTL o BTG (Loh y Choo, 2013). Antes de utilizar la biomasa del aceite de palma como materia prima para los biocombustibles de segunda generación, existe la necesidad de un pretratamiento de la biomasa para reducir el



contenido de humedad y el tamaño, lo que puede ser costoso y de gran intensidad energética. Por ejemplo, se requieren dimensiones en  $\mu\text{m}$  (micras) para la producción de biolíquidos a través de ciertos procesos microbianos. La biomasa de la palma de aceite puede ser cortada, rallada o secada para reducir la humedad a  $< 40\%$  adecuándola para ser un combustible de caldera. Un mayor tratamiento de la biomasa podría reducir la humedad a  $10\text{-}15\%$ , para la producción de pellets o briquetas (Abu Bakar *et al.*, 2011, Abu Bakar *et al.*, 2015). Las fibras limpias de EFB ( $\sim 10\%$  de humedad) pueden ser embaladas y son aptas para exportaciones, relleno de colchones y para el compuesto plástico-madera. Para la torrefacción, una nueva reducción de la humedad es vital al procesar los biocombustibles sólidos sosteniblemente (Chen *et al.*, 2015). El EFB tratado también puede quemarse en una planta de energía de cogeneración de biomasa para producir electricidad que puede conectarse a la red (Loh y Choo, 2013). Actualmente existen siete plantas de bioenergía de 10 MW, y cuatro de ellas están conectadas a la red (comentario personal).

### I. La biomasa sólida (BTS)

Las briquetas/pellets de biomasa de palma son combustibles ecológicos que pueden utilizarse como combustible doméstico o para grandes plantas de conversión de energía termoquímica, como las calderas de combustión de biomasa. A través de la briquetización y la pelletización, la biomasa de la palma de aceite en forma suelta se comprime/compacta hasta formar combustibles de más alta densidad, mediante tratamiento mecánico para más fácil manejo, transporte y almacenamiento (Abu Bakar *et al.*, 2011); este se puede tratar adicionalmente en pellets/briquetas torrefactadas más densas o en carbón de leña. Entre las tecnologías más maduras que se utilizan están la extrusión de escala y tornillo, y la prensa de pistón para las briquetas, y de troquel de anillo para los pellets. Una producción de briquetas/pellets integrada a las plantas de beneficio de aceite de palma puede ser un planteamiento viable en la producción de biocombustibles sólidos como combustible doméstico, combustible para calderas o combustible para planta de gasificación, y para los mercados locales o de exportación (Abu Bakar *et al.*, 2011).

### II. Biomasa al líquido (BTL)

El bioetanol es un producto potencial para sustituir el uso de combustibles fósiles y químicos en los sectores de transporte e industrial. El bioetanol producido a partir de la biomasa fácilmente convertible, como la caña de azúcar en Brasil, ha sido comercializado con éxito; sin embargo, quedan grandes desafíos por delante cuando se utiliza la biomasa lignocelulósica, tal como la biomasa de la palma de aceite.

En Malasia, el bioetanol puede ser potencialmente producido a partir de dos principales biomases, la de palma de aceite, o sea la EFB, y la OPT mediante la fermentación (Kassim *et al.*, 2011, Tan *et al.*, 2013, Cui *et al.*, 2014, Nurul Adela *et al.*, 2014, Nurul Adela *et al.*, 2015<sup>a</sup>, 2015<sup>b</sup>, Tan *et al.*, 2015). Para producir el bioetanol a partir de la EFB es un factor decisivo el pretratamiento con hidrólisis química y enzimática. Como la biomasa lignocelulósica consta de paredes celulares complejas, asociándose a través de uniones fuertes alrededor de la matriz, se requiere pretratamiento para romper la estructura de la biomasa de la palma de aceite y permitir una eficiente y efectiva hidrólisis de la biomasa celulósica en cuatro componentes principales: azúcares, hemicelulosa, celulosa y lignina. Es importante extraer el licor y la lignina que actúan como inhibidores, para hacer que el hidrolizado de la biomasa restante resulte más accesible al tratamiento químico o biológico. A menudo los microorganismos comerciales, como el *Saccharomyces cerevisiae*, son suficientes para fermentar los hidrolizados, pero producen menos bioetanol. Algunos microorganismos diseñados (Wang *et al.*, 2012) han demostrado ser prometedores al producir más altos rendimientos de bioetanol en el caldo de fermentación.

En la exploración de la viabilidad en el tratamiento de las EFB, se desarrolló un proceso con bisulfito y un pretratamiento de formalina (colaboración entre la Universidad de Tsinghua, la MPOB y Shandong), (Cui *et al.*, 2014, Tan *et al.*, 2015). En este proceso de tratamiento previo fue posible optimizar la producción de bioetanol de las EFB. En resumen, de las 6 t secas de EFB usadas, fue posible producir 1 t de etanol ( $17\%$ ), 0,8 t de lignina de alta pureza ( $14\%$ ) y 4,2 t de jarabe hemicelulósico ( $70\%$ ) como materia prima bioquímica, de los cuales 0,3 t son furfural ( $5\%$ ) (Tan *et al.*, 2013).



El estípite de la palma de aceite (OPT) solo está disponible durante la reforestación. Se debe talar, picar, quitar la corteza y prensar para obtener el jugo. El estudio sobre la producción de bioetanol de la palma mostró resultados prometedores, por cuanto el jugo contiene azúcares convertibles que pueden ser transformados directamente a través de la fermentación (Yamada *et al.*, 2010, Nurul Adela *et al.*, 2015<sup>B</sup>). Sin embargo, se requiere un tratamiento similar a la EFB para convertir las fibras de la palma en bioetanol (Prawitwong *et al.*, 2012).

La biomasa de la palma de aceite, particularmente el polvo de EFB, puede ser pirolizado mediante un reactor de cuarzo fluidizado de lecho fijo a diferentes temperaturas, en el rango de 300 a 700 °C (Sukiran *et al.*, 2011, Sukiran *et al.*, 2014). La pirolisis de la biomasa del aceite de palma genera bioaceites y otros coproductos como biocarbón y gas, en diferentes concentraciones a diferentes rangos de temperatura y tiempos de residencia. La MPOB ha creado una plataforma experimental de pirolisis lenta a pequeña escala, y un kit de biomasa experimental (BEK, del inglés Biomass Experimental Kit) para la producción de biocarbón a gran escala como producto final. El biocarbón producido tiene potencial como remedio para el suelo y para la absorción de carbono. El bioaceite tiene un CV que varía de 20 a 22 MJ/kg, un contenido de humedad entre 18 y 22 %, un contenido de cenizas de 0,37 a 0,65 % y pH entre 3,0 y 3,4 (Sukiran *et al.*, 2009). Se puede obtener de los bioaceites una gran variedad de componentes químicos que contienen grupos funcionales como fenoles, alcoholes, cetonas, aldehídos y ácidos carboxílicos. Otra tecnología que proviene de la pirólisis es la inducida por microondas (Mushtaq *et al.*, 2015).

### III. De la biomasa al gas (BTG)

El gas bioproductor (syngas) es un ejemplo de BTG de EFB. La MPOB ha desarrollado un gasificador compartimentado de lecho fluidizado a escala piloto, para producir gas sintetizado producto de la EFB, el cuesco y el mesocarpio de la palma. La EFB fue previamente tratada y alimentada dentro del lecho fijo del sistema piloto de gasificación de boca abierta y descendente (30 kg/hr), a temperatura de 700-1.000 °C, para emitir gases bioproductores como CO, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en diferentes concentraciones (Rahman *et al.*, 2011). Las

composiciones del gas productor fueron 40 % de H<sub>2</sub>, 30 % de CO y 10 % de CH<sub>4</sub>. Los gases productores pueden ser comprimidos para usarlos en cocinas domésticas y en la generación de energía.

En cuanto al POME, fue convertido en biogás, principalmente para el uso de energía, por ejemplo, para producir energía eléctrica para (actividades agua abajo) dentro y fuera de la red, para que las CHP obtengan vapor y calor, para la co-combustión en calderas de biomasa y generadores diésel, para reducir la utilización de cáscara de la palma y diésel, etc. El POME se enfría, y el aceite residual se elimina y mezcla en el tanque digestor o laguna, para producir una mezcla de CO<sub>2</sub> de 30-35 %, 60-65 % de CH<sub>4</sub> y una cantidad traza de H<sub>2</sub>S por medio de digestión anaeróbica (Loh *et al.*, 2013). Tiene potencial para producir 480 MW (443 molinos en 2014) con 35 % de eficiencia térmica (Loh *et al.*, 2014). En la planta de beneficio de aceite de palma Sg Tenggi Kuala Kubu Bahru, Selangor en una colaboración entre POME, FELDA y Sime Darby Offshore Engineering se investigó una planta en demostración, y se empleó uno de los enfoques de utilización fuera de las instalaciones, es decir, de biogás a BioGNC comprimido (datos no publicados). El embotellado de biogás para producir CH<sub>4</sub> puro es el camino por seguir, puesto que puede usarse como suplemento en el aceite combustible para procesos industriales, uso doméstico o para uso en medios de transporte.

El POME, junto con otros tipos de biomasa de aceite de palma, puede producir unos 96,4 miles de barriles de aceite, que son equivalentes a 13,7 miles de toneladas de aceite, o 4.426 MW de electricidad. El potencial del bioetanol extraído solamente de EFB es de ~ 3.000 mil L (2 mil toneladas), de las hojas de palma y OPT ~ 4.000 mil L, y de las fibras del mesocarpio ~ 2.000 mil L (DTU, 2015). El potencial de bioaceite de EFB es ~3,5 miles de t, y del cuesco de la palma, 2,2 miles de t.

Con este fin, debería procurarse construir en el futuro una biorrefinería integrada con cero descargas, o una refinería “todo-incluido” dentro de una planta de beneficio de aceite de palma. Esta propuesta de biorrefinería podría utilizar subproductos, como los azúcares y el syngas, como plataformas intermedias que pueden utilizarse como bloques de construcción para

la producción de productos químicos y compuestos moleculares más altos, y productos que imitan los del petróleo. Esto añade a la biomasa un mayor valor agregado y cero desperdicios.

## Conclusión

Tomando en cuenta la situación mundial actual, con el precio del crudo a la baja, no parece muy factible embarcarse en la conversión de bioenergía a partir de la biomasa de palma de aceite. Sin embargo, el país necesita prepararse pronto para explotar el uso de

gran cantidad de biomasa de palma de aceite, al ser bendecido por la industria del aceite de palma cuando se trata de solucionar el calentamiento global y el cambio climático. El país ha tenido éxito principalmente en las aplicaciones para la energía, y utilizando la biomasa de la palma de aceite como fertilizante. Es cuestión de tiempo que exista una demanda, acompañada de una infraestructura instalada, así como el apoyo del gobierno, para que la industria esté lista para avanzar hacia aplicaciones de mayor valor, adiciones de valor óptimo, y de cero residuos, especialmente cuando se trata de aprovechar la biomasa de la palma de aceite.

□

## Referencias

- Abdul Aziz, A, Wahid, MB, Choo, YM (2008). Advanced carbon products from oil palm biomass. *J Oil Palm Res Spec Issue*, October 2008:22-32.
- Abdullah, SS, Yusup, S., Ahmad, MM, Ramli, A., Ismail, I. (2010). Thermogravimetry study on pyrolysis of various lignocellulosic biomass for potential hydrogen production. *Int. J. Chem. Biol. Eng.* 3 (3), 137-141.
- Abu Bakar, N., Choo, YM, Joseph, L., Stephen, L., Eddy, L., Loh, SK, Lim, WS & M. Yunus, YM (2015). Improved process for the production of low-ash palm pellet. MPOB Information Series 706, MPOB TT No. 577.
- Abu Bakar, N., Choo, YM, Lim, WS, Joseph, L., Michael, S., Mohamad Halim, R., *et al.* (2011). Briquetting of empty fruit bunch fibre and palm shell as a renewable energy fuel. *J Eng Appl Sci* 6:446-51.
- Basiron, Y., Chan, KW (2004). The oil palm and its sustainability. *J Oil Palm Res.* 16:1-10.
- Chan, KW, Watson, I., Lim, KC (1981). Use of oil palm waste material for increased production. *The Planter*, 57(658):14-37.
- Chan, KW (1999). Biomass production in the oil palm industry, in: Durmit, S., Lim, K.H., Teo, L., Lee, K.D. (Eds.), *Oil Palm and the Environment*. Malaysian Oil Palm Growers' Council, Kuala Lumpur, pp. 45-50.
- Chen, W-H, Peng, J., Bi, XT (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44:847-866.
- Cui, X., Zhao, X., Zeng, J., Loh, SK, Choo, Y., M, Liu D. (2014). Robust enzymatic hydrolysis of Formiline-pretreated oil palm empty fruit bunches (EFB) for efficient conversion of polysaccharide to sugars and ethanol. *Bioresource Technology* 166:584-591.
- DTU (2005). Danish Technology: Wet-explosion followed by enzymatic hydrolysis.
- Gurmit, S. (1994). Management and utilization of oil palm by-products. 3rd National Seminar on Utilization of Oil Palm Tree and Other Palms, pp. 19-48.

- Ibrahim, Z., Abdul Aziz, A., Ramli, R., Wan Hassan, WH, Zainal, NH. (2011). Optimum parameters for the production of MDF using 100% oil palm trunks. MPOB Information Series 566, MPOB TT No. 493.
- Kassim, MA., Abu Bakar, N., Loh, SK., Abdul Aziz, A. (2011). Influence of solid loading concentrations, inoculums size and nitrogen sources on ethanol production from empty fruit bunches (EFB) hydrolysate in separate hydrolysis and fermentation (SHF). *Res J Appl Sci* 6:310-19.
- KeTTHA (2010). Kementerian Tenaga, Teknologi Hijau Dan Air. National Renewable Energy Policy and Action Plan.
- Khalid, H., Zin, ZZ, Anderson, JM (1999). Quantification of oil palm biomass and nutrient value in a mature plantation. *J Oil Palm Res.* 11(1):23-32.
- Kong, SH., Loh, SK., Bachmann, RT., Rahim, SA., Salimon, J. (2014). Biochar from oil palm biomass: A review of its potential and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39:729-739.
- Loh, SK, Lai, ME, Ngatiman, M., Lim, WS, Choo, YM, Zhang, Z., Salimon, J. (2013). Zero discharge treatment technology palm oil mill effluent, *JOPR* 25(3):273-281.
- Loh SK, Nasrin AB, Nurul, Adela B., Mohammad Azri, S., Muzzammil, N., Daryl Jay, T., Stasha Eleanor, RA, Mohd Faris, MR, Lim, WS, Choo, YM. (2014). Biogas Capture & Utilization from Palm Oil Mill Effluent. MPOB, Ministry of Plantation Industries and Commodities.
- Loh, SK, Choo, YM. (2013). Prospect, challenges and opportunities on biofuels in Malaysia. In: Pogaku R, Hj. Sarbatly R, editors. *Advances in biofuels*. New York: Springer, pp. 3-14.
- Loh, SK, Subramaniam, V., Ngatiman, M. (2012). Oil Palm Biomass Energy Resource Data. Malaysian Palm Oil Board, pp. 1-24.
- Ma AN, Choo, YM, Yusof, B. (1994). Renewable energy from the palm oil industry. *J. Oil Palm Res.* 6 (2):138-146.
- MES (2010). Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. Construct the world's first demonstration plant to produce bioethanol from waste products. <<http://www.mes.co.jp/english/press/2010/20101228.html>> [accessed February 2012].
- Mokhtar, A., Hassan, K., Abdul Aziz, A., Wahid, MB (2011). Plywood from oil palm trunks. *J Oil Palm Res.* 23:1159-65.
- Mushtaq, F., Tuan Abdullah, TA, Mat, R, Ani, FN (2015). Optimization and characterization of bio-oil produced by microwave assisted pyrolysis of oil palm shell waste biomass with microwave absorber. *Bioresource Technology* 190: 442–450.
- Nurul Adela, B., Nasrin, AB, Loh, SK, Choo, YM (2014). Bioethanol Production by Fermentation of Oil Palm Empty Fruit Bunches Pretreated with Combined Chemicals. *J. Appl. Environ. Biol. Sci.*, 4(10):234-242.
- Nurul Adela, B., Loh, SK, Nasrin,, AB (2015a). The improvement on enzymatic hydrolysis of oil palm (*Elaeis guineensis*) empty fruit bunch lignocellulose. *Malaysian Applied Biology* 44(1): 95–100.
- Nurul Adela, B., Loh, SK (2015b). Optimisation of fermentation conditions for bioethanol production from oil palm trunk sap by *Saccharomyces cerevisiae*. *Malaysian Journal of Microbiology* 11(2):163–169.
- Pemandu (2011). Performance Management and Delivery Unit. Palm Oil EPP 7: Commercializing Second-Generation Biofuels. Economic Transformation Programme Annual Report 2011. Putrajaya, p. 97.
- Prawitwong, P., Kosugi, A., Arai, T., Deng, L., Lee, KC, Darah, I., Murata, Y., Othman, S., Rokiah, H., Sudesh, K., Wan Asma, I., Saito, M., Mori, Y. (2012). Efficient ethanol production from separated parenchyma and vascular bundle of oil palm trunk. *Bioresource Technology* 125:37-42.

- Rahman, ZA, Ravi Menon, N., Ku Hamid, KH (2011). Air gasification of palm biomass for producing tar-free higher heating value producer gas. *J. Oil Palm Res.* 23:1060-1068.
- Ravi Menon, N., Abdul Rahman, Z, Abu Bakar, N. (2003). Empty fruit bunches evaluation: mulch in plantation vs. fuel for electricity generation. *Oil Palm Ind Econ J*, 3:15-20.
- Shen, SC-Zhou, YJ-Mi, J.Zhang, JA.Dai, LM.Liu, DH.Choo, YM, Loh, SK (2014). Preparation of surfactants for enhanced oil recovery from alkali lignin pretreated with hydrogen peroxide. *Chemistry and Industry of Forest Products* 34(1):57-61.
- Sukiran, MA, Abu Bakar, NK, Chow, MC (2009). Optimisation of pyrolysis of oil palm empty fruit bunches. *J Oil Palm Res* 21:653-58.
- Sukiran, MA, Loh, SK, Nasrin, AB, Choo, YM (2014). Pyrolysis of empty fruit bunches: Influence of temperature on the yields and composition of gaseous product. *American Journal of Applied Sciences* 11(4):606-610.
- Sukiran, MA, Loh, SK, Nasrin, AB, Choo, YM (2011). Production and characterisation of bio-char from the pyrolysis of empty fruit bunches. *Am J Appl Sci* 8:984-88.
- Sumathi, S., Chai, SP, Mohamed, AR (2008). Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia. *Renewable Sustainable Energy Rev* 12:2404-21.
- Tan, L., Sun, W., Li, X., Zhao, J., Qu, Y., Choo, YM and Loh, SK (2015). Bisulfite pretreatment changes the structure and properties of oil palm empty fruit bunch to improve enzymatic hydrolysis and bioethanol production. *Biotechnology Journal* 10(6): 915-925.
- Tan, L., Yu, Y., Li, X., Zhao, J., Qu, Y., Choo, YM, Loh, SK (2013). Pretreatment of empty fruit bunch from oil palm for fuel ethanol production and proposed biorefinery process. *Bioresource Technology* 135:275-82.
- Voegelé, E. (2014). FAO report highlights global growth in pellet production. <http://www.biomass-magazine.com/articles/11370/fao-report-highlights-global-growth-in-pellet-production>
- Wang, Z., Ong, HX, Geng, A. (2012). Cellulase production and oil palm empty fruit bunch saccharification by a new isolate of *Trichoderma koningii* D-64. *Process Biochemistry* 47(11):1564–1571.
- Yamada, H., Tanaka, R., Sulaiman, O., Hashim, R., Hamid, ZAA, Yahya, MKA, *et al.* (2010). Old oil palm trunk: a promising source of sugars for bioethanol production. *Biomass Bioenergy* 34:1608-1613.
- Yusoff, S. (2006). Renewable energy from palm oil – innovation on effective utilization of waste. *J Cleaner Prod* 14:87-93.
- Zhang, J., Geng, A., Yao, C., Lu, Y, Li Q. (2012). Effects of lignin-derived phenolic compounds on xylitol production and key enzyme activities by a xylose utilizing yeast *Candida athensensis* SB18. *Bioreso.*