

Treatment and Disposal of Oily Sludge from IX-Talara Oilfield by Vacuum Pyrolysis

Victor Pretell, MSc¹, Williams Ramos, MSc¹, and Herbert Manrique, MSc¹

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, vpretellh@uni.edu.pe, wramosv@uni.edu.pe, hmanrique@uni.edu.pe

Abstract- Oily Sludge (OS) is a complex combination of oil and water emulsions with suspended solid impurities. These have high viscosity and stable emulsions that prevent the settling of solid components. It is estimated that one ton of crude oil produces between 0.3% and 0.5% of OS. Pyrolysis is a process in which the raw material is heated to high temperatures (400-1000 °C) in a reactor without oxygen or in an anaerobic atmosphere. This causes the breaking of C-C and C-H bonds in the compound, producing lower molecular weight hydrocarbons in the form of condensed liquids or non-condensable gases. The research aimed to determine whether vacuum pyrolysis is a suitable treatment for disposing of oily sludge from crude oil storage tanks in northeastern Peru. It also evaluated how the pyrolysis operating temperature influences the yield of liquid, solid, and gaseous products. Vacuum pyrolysis was carried out on a sample of oily sludge from oil production operations in Lot IX in Talara, Peru. The yield of liquid, solid, and gaseous products was evaluated, and the liquid hydrocarbon fraction was characterized. The best results were achieved at a temperature of 550 °C and a pressure of 31.33 kPa abs. The yield of liquid products (crude oil and water) was 81.4%, while that of solid products reached 10.3% and that of gases was 8.3%. The liquid hydrocarbon obtained under these conditions has a density of 864 kg/m³, a viscosity at 50 °C of 6.88 cSt, and a higher heating value of 40.16 MJ/kg. It is concluded that pyrolysis is a useful process for disposing of oily sludge.

Keywords—Pyrolysis, oily sludge, waste sludge, oil.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Tratamiento y Disposición de los Residuos Oleosos del Lote IX-Talara por Pirólisis al Vacío

Victor Pretell, MSc¹, Williams Ramos, MSc¹, and Herbert Manrique, MSc¹

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, vpretellh@uni.edu.pe, wramosv@uni.edu.pe, hmanrique@uni.edu.pe

Resumen— Los residuos oleosos (RO) son una combinación compleja de emulsiones de petróleo y agua, con impurezas sólidas suspendidas. Estos tienen alta viscosidad y emulsiones estables que impiden la sedimentación de los componentes sólidos. Se estima que una tonelada de petróleo crudo produce entre 0.3% y 0.5% de RO. La pirólisis es un proceso en el que se calienta la materia prima a altas temperaturas (400-1000 °C) en un reactor sin oxígeno o en una atmósfera anóxica. Esto provoca la ruptura de los enlaces C-C y C-H en el compuesto, produciendo hidrocarburos de menor peso molecular en forma de líquidos condensados o gases no condensables. La investigación buscó determinar si la pirólisis al vacío es un tratamiento adecuado para disponer los residuos oleosos (borras) de los tanques de almacenamiento de crudo del noreste del Perú, y evaluar cómo la temperatura de operación de la pirólisis influye en el rendimiento de productos líquidos, sólidos y gaseosos. Se llevó a cabo la pirólisis al vacío en una muestra de residuo oleoso (RO) proveniente de las operaciones de producción de petróleo en el Lote IX en Talara, Perú. Se evaluó el rendimiento de productos líquidos, sólidos y gaseosos y se caracterizó la fracción de hidrocarburos líquidos. Se lograron los mejores resultados a una temperatura de 550 °C y una presión de 31.33 kPa abs. El rendimiento de productos líquidos (crudo y agua) fue del 81.4%, mientras que el de productos sólidos alcanzó el 10.3% y el de gases el 8.3%. El hidrocarburo líquido obtenido bajo estas condiciones presenta una densidad de 864 kg/m³, una viscosidad a 50 °C de 6.88 cSt y un poder calorífico superior de 40.16 MJ/kg. Se concluye que la pirólisis es un proceso útil para disponer de los residuos oleosos.

Palabra clave— Pirólisis, borra, residuo oleoso, petróleo.

I. INTRODUCCIÓN

La industria del petróleo y gas clasifica sus operaciones en a) upstream: Exploración y producción, b) midstream: Transporte y almacenamiento y c) downstream: Refinación y comercialización, en todas estas etapas se producen inevitablemente una serie de desechos aceitosos y viscosos que en forma genérica se denomina residuo oleoso (RO), que comprende a las borras, lodos, desechos aceitosos y tierras empetroadas [1], [2], [3]. En la etapa de producción y exploración del petróleo y gas, se generan residuos oleosos como los fluidos de perforación, aguas residuales de petróleo, lodos de plantas de tratamiento de efluentes de petróleo y lodos de fondos de tanques de almacenamiento [4]. La mayor cantidad de residuos oleosos están en las pozas o piscinas de residuos y en los tanques de almacenamiento de crudo [1]. Por cuestiones de espacio de almacenamiento y la tecnología de procesamiento, los residuos oleosos de diferentes fuentes generalmente se mezclan, lo que hace que las composiciones de los residuos oleosos sean muy complejas y por ello difíciles de tratar [5].

En los campos petroleros que están en una etapa de desarrollo de alto corte de agua y donde se aplica la tecnología de recuperación química mejorada de petróleo (EOR), las propiedades de los líquidos producidos (mezcla de petróleo, agua y productos químicos de los pozos) se vuelven más complejas formándose grandes cantidades de lodos aceitosos en deshidratadores, tanques de almacenamiento y tanques de desechos oleosos durante el proceso de deshidratación de petróleo crudo [6].

Según las fuentes de generación, el residuo oleoso (RO) se puede dividir en residuo oleoso de campos petroleros (ROCP), residuo oleoso de almacenamiento y transporte (ROTT), residuo oleoso de refinería (ROR) y residuo oleoso de derrames (ROD) [3].

Los residuos oleosos (RO) son una mezcla compleja de emulsiones de petróleo en agua (O/W), agua en aceite (W/O) e impurezas sólidas suspendidas, y tienen las características de una fuerte estabilidad de la emulsión y alta viscosidad y, en particular, los componentes de la fase sólida sedimentan difícilmente [6]. En general un RO contiene 10 a 50% de hidrocarburos, 30 a 85% de agua, 5 a 46% de partículas sólidas, hasta 1% de nitrógeno, y 5% de azufre en promedio y cantidades variables de metales pesados [3], [7], [8], [9], [10]. La alta presencia de azufre se correlaciona con la calidad del crudo [10]. Muchos de los compuestos que conforman los RO son elementos malolientes, tóxicos y peligrosos. Estos incluyen bacterias, compuestos azufrados, nitrogenados, cera, asfaltenos, coloides, hidrocarburos, metales pesados y contaminantes orgánicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos HAP [2]. La mayoría de los componentes son recalcitrantes debido a sus estrechos enlaces moleculares, alto peso molecular, hidrofobicidad y poca solubilidad en agua [4].

Los RO se consideran un desecho peligroso porque son una emulsión estable que puede contener cuatro tipos de componentes peligrosos: 1) orgánicos, incluidos los HAP, fenoles y derivados del benceno (BTEX, es decir, benceno, tolueno, etilbenceno y xileno); 2) elementos peligrosos (N, S y Cl) y metales pesados; 3) microorganismos patógenos; 4) sustancias radiactivas. Por ejemplo, los TPH (hidrocarburos totales de petróleo) poseen fuertes capacidades de sorción contra los coloides y las materias orgánicas presentes en el suelo, la contaminación por TPH en el mar tiene riesgos carcinogénicos, teratogénicos y mutagénicos [3]. En el caso de los metales pesados tóxicos —As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn— en el RO tienen tres fuentes de origen: 1) petróleo crudo; 2) fluido de perforación durante la explotación petrolera y desprendimiento de impurezas provenientes de oleoductos y

tanques; 3) residuos minerales inorgánicos [1], [2], [3], [11]. Es por ello que, la eliminación inadecuada de estos desechos puede dañar gravemente los ecosistemas ambientales y la salud humana [7], [8].

Las empresas del sector petróleo y gas se enfrentan al problema del manejo de grandes cantidades de residuos oleosos [5]. Se estima una producción de más de 60 millones de toneladas de RO anualmente, y una acumulación de más de 1000 millones de toneladas de RO en todo el mundo [1], [11]. Las investigaciones respecto al tema indican que una tonelada de petróleo crudo producirá entre 0.3% a 0.5% de RO [2]. En Perú un estudio realizado por [12] halló que por cada 75 barriles producidos de crudo se tiene un barril de residuo oleoso, según ese dato y considerando la producción de crudo en los lotes petroleros de la zona de Talara [13] se tiene que el año 2022 se habría producido 17849 t de RO.

Los métodos de tratamiento y disposición de residuos oleosos se listan en la Tabla I [4], estos se desarrollan debido a la evolución de las regulaciones ambientales y a la necesidad de minimizar la producción de RO. Para ello se han investigado una variedad de enfoques de tratamiento de los RO, que incluyen técnicas físicas (filtración, sedimentación o centrifugación), químicas (extracción, solidificación), térmicas (pirólisis, incineración) y biológicas (descomposición microbiológica, descomposición biotérmica) o una combinación de estas [7], [3], [4].

El vertido es decir la disposición en rellenos de seguridad industrial se está volviendo inviable debido a la fuerte toxicidad de los RO. La incineración requiere grandes costos de inversión, alto consumo de energía y genera contaminantes secundarios significativos (p. ej., SO_x, NO_x, metales pesados y partículas). La extracción con solvente puede recuperar efectivamente los hidrocarburos; sin embargo, los procesos necesarios consumen grandes cantidades de reactivos químicos y recursos hídricos. El tratamiento microbiano es simple y rentable, pero su tasa de recuperación de energía es bastante baja. La centrifugación es una técnica de uso común; sin embargo, su rendimiento depende en gran medida de la viscosidad del RO, y el aceite separado debe procesarse más para obtener productos valiosos. La irradiación ultrasónica puede reducir rápidamente la estabilidad de las emulsiones y lograr una separación más efectiva, pero las aplicaciones a gran escala están limitadas por sus altos costos operativos [8].

Al emplear estos métodos, se pueden reducir o eliminar las sustancias tóxicas y mitigar los efectos ambientales peligrosos mientras que otras se utilizan para la recuperación de energía. Muchos de los métodos listados en la Tabla I se consideran desventajosos debido a su alto costo, baja eficiencia, generación de contaminación secundaria y largos periodos de tratamiento [7], [11]. En cambio, la pirólisis cumple los dos propósitos mencionados anteriormente y puede ser una de las tecnologías más prometedoras con potencial de investigación y valor práctico porque permite recuperar hidrocarburos de bajo peso molecular con un bajo costo de producción [1], [7].

TABLA I
MÉTODO DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS OLEOSOS

Tratamiento	Ventaja	Desventaja
Centrifugación	Limpio y eficiente. Recupera <50% de crudo	Mucho espacio, caro y origina problemas ambientales
Flotación de espuma	Aplicación simple. Recupera 60% crudo	Baja eficiencia
Congelamiento/ Descongelamiento	Útil en regiones frías. Recupera 60% crudo	Alto consumo de energía
Electrocínética	Rápido y eficiente. Recupera 60% crudo	Alto consumo de energía
Ultrasonido	Rápido y eficiente. Recupera 70% crudo	Muy costoso
Extracción por solventes	Simple. Recupera 70% crudo	Baja eficiencia grandes volúmenes
Pirólisis	Fácil y simple. Recupera 70% crudo	Alto consumo de energía
Surfactantes EOR	Rápido y económico. Recupera 80% crudo	No amigable al medio ambiente
Land farming	Bajo costo de operación. Elimina 80% crudo	Proceso lento, puede tener problemas ambientales
Biopila/ Compostaje	Gran capacidad. Elimina 80% crudo	Alto costo de operación
Microondas	Rápido y eficiente. Recupera 90% crudo	Alto consumo de energía
Incineración	Rápido y eficiente. Recupera 90% crudo	Altos costos y problemas ambientales
Estabilización/ Solidificación	Rápido y eficiente. Recupera 90% crudo	Útil solo para RO con bajo contenido de agua
Oxidación	Rápido y eficiente. Recupera 90% crudo	Alto costo de operación, contaminación ambiental
Lodo biológico	Tratamiento rápido, área pequeña. Recupera 90% crudo	Alto costo de operación requiere tratamiento al residuo

La pirólisis consiste en colocar la materia prima en un reactor y calentarla a altas temperaturas (400-1000 °C) en una atmósfera libre de oxígeno o anóxica. En estas condiciones, los enlaces C-C y C-H en el compuesto se rompen para obtener hidrocarburos con menor peso molecular ya sea después de condensar como líquidos o como gases no condensables. El producto final siempre es carbón, líquido y gases según sean las condiciones operativas de la pirólisis [1], [4], [8]. La pirólisis puede clasificarse según la temperatura en pirólisis de baja temperatura, media temperatura y alta temperatura. La pirólisis a baja temperatura se lleva a cabo entre 450-550 °C y produce menos gas y más líquido y residuos sólidos. La pirólisis de temperatura media se efectúa a temperaturas de hasta 800 °C y produce más gas que la pirólisis de baja temperatura, pero menos líquido y sólidos. La pirólisis de alta temperatura se produce a 900-1050 °C y produce la mayor cantidad de gas, con menos líquido y sólidos. La pirólisis también puede clasificarse según los tipos de reacciones, en pirólisis oxidativa y seca. En la pirólisis

oxidativa, ocurre la descomposición térmica de los residuos que contienen hidrocarburos y su combustión parcial. Este método es adecuado para tratar los residuos (viscosos, pastosos, etc.) que no responden bien a la incineración o la gasificación. La pirólisis seca es la descomposición térmica de los residuos carbonosos sin oxígeno. Esto permite procesar los residuos y obtener productos útiles como combustible y materias primas químicas. En la pirólisis seca, se obtiene gas de pirólisis, líquidos y residuos sólidos carbonosos [14].

Zang et. al, realizaron experimentos de pirólisis de residuos oleosos de fondos de tanques de almacenamiento de petróleo (RO) y residuos oleosos y suelo (ROS) en un reactor tubular. Los productos de la pirólisis se recogieron y analizaron por separado. El rendimiento de compuestos carbonosos RO y ROS fue del 50% y el 70%, respectivamente. Aunque hay diferencias en el contenido de petróleo de los dos tipos de RO petrolíferos, el rendimiento de petróleo se mantuvo casi igual, entre el 7% y el 8% en ambos casos. Cuando la temperatura de pirólisis se elevaba a 500°C, el rendimiento de cada producto no cambió mucho, pero su composición experimentó cambios obvios. La alta temperatura es más propicia para la producción de productos de moléculas pequeñas. Los resultados mostraron que el tratamiento de pirólisis de los RO petrolíferos fue efectivo para recuperar gas y aceite de pirólisis que son útiles energéticamente [15].

La pirólisis de RO ha atraído más atención debido a sus condiciones de operación suaves, alta eficiencia energética, reducción de volumen significativa y bajas emisiones contaminantes. Se han investigado las influencias de la velocidad de calentamiento, la temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia en la obtención de los productos de pirólisis, algunas investigaciones encontraron influencias significativas en las altas velocidades de calentamiento en la descomposición de las fracciones pesada, pero se requieren estudios específicos para cada RO a procesar debido a la alta variabilidad en la composición de la carga [8].

El objetivo de la investigación es determinar si la pirólisis al vacío es un tratamiento factible para disponer los residuos oleosos (borras) de los tanques de almacenamiento de crudo del noreste del Perú, asimismo se busca evaluar como la temperatura de operación de la pirólisis influye en el rendimiento de productos líquidos, sólidos y gaseosos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Muestra de residuo oleoso

Se obtuvo una muestra de 4 litros de borras de los tanques de almacenamiento de petróleo crudo, ubicados en el Lote IX, Talara, Perú. El residuo fue caracterizado para determinar el contenido de agua, hidrocarburos y sólidos.

B. Metodología

1) *Pirólisis al vacío*: Para cada corrida en la pirólisis al vacío (Fig. 1) se empleó 100 g de RO, —al que no se le realizó ningún tratamiento previo—, una presión de 31.33 kPa abs., y se varió la temperatura entre 450, 500, 550 y 600°C. Cada corrida duró 180 minutos. Se efectuaron tres corridas

para cada una de las temperaturas a fin de garantizar la reproducibilidad de las mediciones. Se determinó el rendimiento de productos líquidos, sólidos y los gases se obtuvieron por balance de masa.

C. Caracterización del residuo oleoso

Se siguió el procedimiento aplicado por Li [16]. Primero se pesa 5 g de una muestra de residuo oleoso y se seca en una estufa a 105°C por 24 horas para eliminar el agua, se registra el peso final y se obtiene el contenido de agua por diferencia y se calcula el % de agua según (1).

$$\% \text{ Agua} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

Donde m_0 y m_1 son el peso del RO antes de secar y después del secado respectivamente.

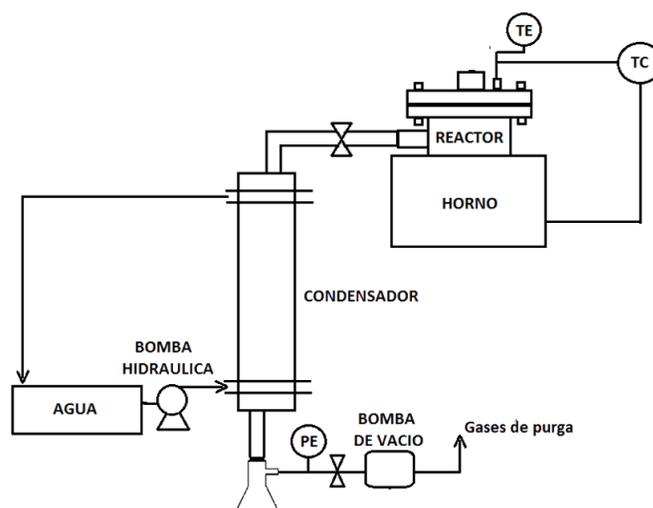


Fig. 1 Esquema del equipo de pirólisis.

Luego la muestra seca es extraída usando tolueno como solvente en un extractor Soxhlet para separar los hidrocarburos de los sólidos. Terminado el proceso de extracción se secan los sólidos en una estufa a 120°C por 16 horas, se pesa el sólido seco y se obtiene la masa de sólidos y se calcula el porcentaje de sólidos según (2).

$$\% \text{ Sólidos} = \frac{m_1 - m_2}{m_0} \times 100 \quad (2)$$

Donde m_1 y m_2 son el peso del sólido antes de ser extraído y después de la extracción con tolueno.

El contenido de hidrocarburos se obtiene por diferencia, según (3).

$$\% \text{ Hidrocarburos} = 100 - \% \text{ Agua} - \% \text{ Sólidos} \quad (3)$$

D. Caracterización de los líquidos de pirólisis

El producto líquido obtenido en la pirólisis al vacío fue analizado para determinar su calidad, se realizaron los siguientes ensayos: Viscosidad cinemática (ASTM D445), Poder calorífico superior (ASTM D240), y Densidad por el método del picnómetro (ASTM D70).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Caracterización del residuo oleoso

Se determinó que el contenido de agua es 48.84% (m/m), el contenido de hidrocarburos 44.48% (m/m) y el contenido de sólidos 6.68% (m/m), valores similares han sido reportados por Li [16] y Wang [10] para residuos oleosos provenientes de campos de producción de petróleo.

B. Productos de la pirólisis

El rendimiento porcentual de los productos obtenidos en la pirólisis al vacío (31.33 kPa abs.) de los residuos oleosos se presentan en la Tabla II.

TABLA II
RENDIMIENTOS DE PRODUCTOS EN LA PIRÓLISIS AL VACÍO DE RESIDUOS OLEOSOS (REACTOR H1, PRESIÓN = 31.33 kPA ABS)

Temperatura (°C)	Líquidos (% m/m)	% Sólidos (% m/m)	Gases (% m/m)
450	87.6	6.8	5.6
500	86.6	7.8	5.6
550	91.2	5.2	3.6
600	89.4	2.6	8.1

Se observó que los líquidos obtenidos una vez que están a temperatura ambiente tendían a la formación de ceras y separación de agua, se muestran los resultados de la composición del producto líquido en la Tabla III.

TABLA III
COMPOSICIÓN DE LA FASE LIQUIDA (REACTOR H1, PRESIÓN = 31.33 kPA ABS)

Temperatura (°C)	450	500	550	600
Crudo (% m/m)	42.1	23.8	25.6	22.7
Ceras (% m/m)	11.4	28.2	25.3	25.7
Agua (% m/m)	34.2	34.7	40.3	41.0
Total, líquidos (% m/m)	87.6	86.6	91.2	89.4

En la Fig. 2 se muestran los productos líquidos (hidrocarburos/ceras) y sólidos y en la Fig. 3 se puede apreciar el crudo y el agua en su proceso separación.

Los rendimientos dependen mucho de las condiciones operativas de la pirólisis y de la composición del RO, a 450°C parte del agua aún se encuentra emulsionada con el hidrocarburo (petróleo crudo o crudo), la mayor formación de ceras a temperaturas mayores de 450°C se debe a las reacciones secundarias de polimerización que continúan en el condensador lo que indica que el enfriamiento no es adecuado

o que se requiere una nueva configuración de reactor para asegurar la ruptura de las moléculas.

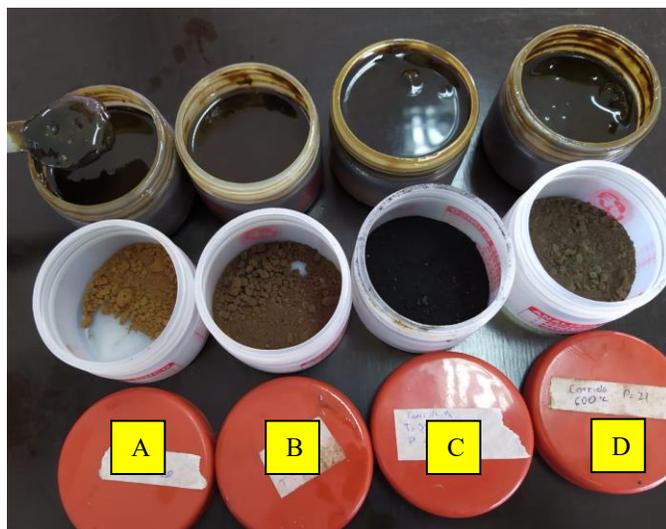


Fig. 2 Productos líquidos (hidrocarburos) y sólidos de la pirólisis. A) 450 °C, B) 500 °C, C) 550 °C y D) 600 °C.

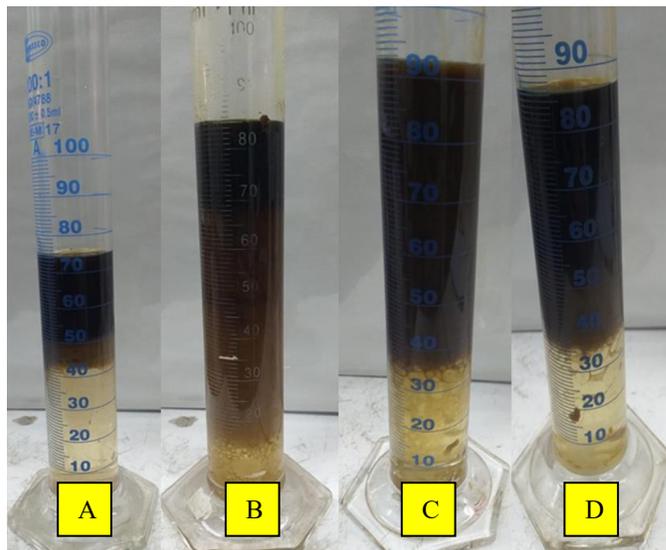


Fig. 3 Productos líquidos (hidrocarburo/Agua) de la pirólisis. A) 450°C, B) 500°C, C) 550°C y D) 600°C.

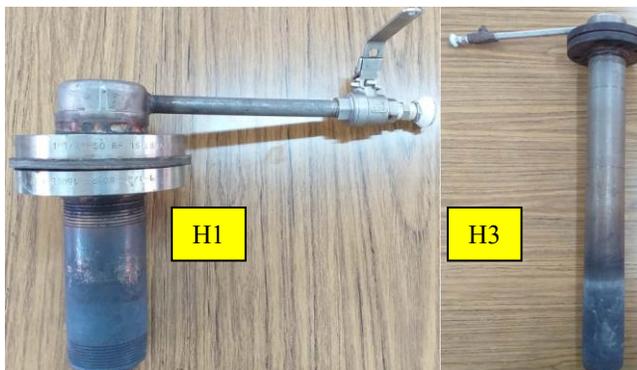


Fig. 4 Reactores empleados en las pruebas experimentales.

Se corrió otra serie experimental en un nuevo tipo de reactor (H3) con una zona de condensación que crea un reflujo interno para lograr una mayor ruptura de los hidrocarburos. En la Fig. 4 se muestran los reactores empleados.

Para las corridas experimentales en el reactor H3, se mantuvieron las mismas condiciones de temperatura y presión, los resultados se muestran en la Tabla IV.

TABLA IV
RENDIMIENTOS DE PRODUCTOS EN LA PIRÓLISIS AL VACÍO DE RESIDUOS OLEOSOS (REACTOR H3, PRESIÓN = 31.33 kPa ABS.)

Temperatura (°C)	Líquidos (% m/m)	% Sólidos (% m/m)	Gases (% m/m)
450	56.8	38.4	4.8
500	63.4	28.9	7.7
550	81.4	10.3	8.3
600	83.3	7.4	9.3

En este reactor no se formaron ceras, solo se obtuvo crudo y agua por lo que la configuración del reactor H3 es mejor para tratar los residuos oleosos y recuperar una fracción de hidrocarburos. Los porcentajes de sólidos a 450°C y 500°C son muy altos e indican que parte del hidrocarburo se está carbonizando, es decir el reciclo interno está originando reacciones secundarias que llevan a la formación de carbón probablemente siguiendo un mecanismo similar a la formación del biochar en la pirólisis de la biomasa.

En la Tabla V se presenta la composición de la fase líquida del producto obtenido en el reactor H3 y se comparan con los resultados de la investigación de Tang [17] los cuales se resumen en la Tabla VI.

TABLA V
COMPOSICIÓN DE LA FASE LÍQUIDA (REACTOR H3, PRESIÓN = 31.33 kPa ABS)

Temperatura (°C)	450	500	550	600
Crudo (% m/m)	26.0	29.2	38.2	40.3
Agua (% m/m)	30.8	34.2	43.2	43.0
Total, líquidos (% m/m)	56.8	63.4	81.4	83.3
Gas (% m/m)	4.8	7.7	8.3	9.3
Sólidos (% m/m)	38.4	28.9	10.3	7.4

TABLA VI
RESULTADOS EXPERIMENTALES EN LA PIRÓLISIS A ESCALA DE LABORATORIO REPORTADOS POR TANG ET AL. [17]
(PRESIÓN ATMOSFÉRICA, GAS DE ACARREO NITRÓGENO)

Temperatura (°C)	450	500	550	600
Crudo (% m/m)	16.7	17.1	15.9	14.6
Agua (% m/m)	61.7	61.9	62.8	64.4
Total, líquidos (% m/m)	78.4	79.0	78.7	79.0
Gas (% m/m)	4.2	5.2	9.1	8.5
Sólidos (% m/m)	17.4	17.1	15.8	15.7

Los resultados de Tang et al. [17] detallados en la Tabla VI muestran la misma tendencia en la acumulación de carbón a 450°C y 500°C aunque en mucho menor cantidad, el rendimiento de gases es también menor pero muestra una tendencia creciente similar a los resultados de esta investigación. Respecto al rendimiento de líquidos (crudo y agua) es más estable a lo largo de las temperaturas estudiadas, pero con un mayor contenido de agua lo que es coherente dado el contenido inicial presente en el residuo oleoso. Se tiene la misma tendencia en nuestros resultados, pero la recuperación de hidrocarburos es mayor debido a que el residuo oleoso de Tang tiene menor contenido de hidrocarburos.

C. Caracterización del producto líquido

Del producto líquido se extrajo el hidrocarburo y se determinó: Viscosidad cinemática a 50°C (ASTM D445), Poder calorífico superior (ASTM D240), y Densidad por el método del picnómetro (ASTM D70), en la Tabla VII se muestran los resultados a cada temperatura de pirólisis.

TABLA VII
CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS HIDROCARBUROS LÍQUIDOS

Hidrocarburos del reactor H1				
Temperatura (°C)	450	500	550	600
Densidad (kg/m ³)	901	882	908	949
Viscosidad a 50°C (cSt)	8.42	20.76	a	b
PCS ^c (MJ/kg)	26.69	35.03	34.72	29.35
Hidrocarburos del reactor H3				
Temperatura (°C)	450	500	550	600
Densidad (kg/m ³)	851	856	864	868
Viscosidad a 50°C (cSt)	7.28	6.26	6.88	5.48
PCS (MJ/kg)	36.2	42.9	40.16	42.73

^a No se contó con suficiente muestra para el ensayo

^b No se pudo porque hubo mucha presencia de ceras

^c Poder Calorífico Superior

Se comparan estos resultados con algunas de las propiedades del crudo tipo Talara que se muestran en la Tabla VIII [18]. Se aprecia que los mejores resultados se hallan para el hidrocarburo obtenido en el reactor H3 a las temperaturas de 500°C y 550°C. Combinando estos resultados con los rendimientos mostrados en la Tabla IV se tiene que la temperatura de 550°C da los más altos rendimientos en productos líquidos y con una calidad similar a la del crudo Talara.

TABLA VIII
PROPIEDADES DEL CRUDO TALARA [18]

Parámetro	Valor	
	Mínimo	Máximo
Densidad (kg/m ³)	826	966
Viscosidad a 50°C (cSt)	2.23	21.51
PCS (MJ/kg)	41.72	46.21

IV. CONCLUSIONES

Se realizó la pirólisis al vacío de una muestra de residuo oleoso (borra) proveniente de las actividades de producción de petróleo del Lote IX ubicado en Talara, Perú. Se determinó que los mejores resultados se obtienen a una temperatura de 550°C, presión de 31.33 kPa abs. con un 81.4% de rendimiento de productos líquidos (crudo y agua), 10.3% de productos sólidos y 8.3% de gases.

Se separó el producto líquido en una fase hidrocarburo y una fase acuosa por decantación y se midieron las propiedades del hidrocarburo y se determinó que los mejores valores de la densidad, viscosidad y poder calorífico superior se obtienen para la temperatura de 500 °C y 550 °C.

Se tuvo que modificar el reactor de pirólisis (H1) porque en las corridas iniciales se observó un alto contenido de ceras lo que hacía inviable el proceso, en el reactor modificado (H3) se consiguió evitar la formación de ceras.

Se concluye que la pirólisis es un proceso útil para disponer de los residuos oleosos provenientes de los tanques de almacenamiento de petróleo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica por el financiamiento del proyecto.

REFERENCIAS

[1] M. Uyar and H. Aydın, "Production of low sulfur diesel-like fuel from crude oil wastes by pyrolytic distillation and its usage in a diesel engine," *Energy*, vol. 244, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122683.

[2] A. H. Jagaba *et al.*, "Circular economy potential and contributions of petroleum industry sludge utilization to environmental sustainability through engineered processes - A review," *Clean. Circ. Bioeconomy*, vol. 3, no. September, p. 100029, 2022, doi: 10.1016/j.clcb.2022.100029.

[3] J. Li *et al.*, "A critical review on energy recovery and non-hazardous disposal of oily sludge from petroleum industry by pyrolysis," *J. Hazard. Mater.*, vol. 406, p. 124706, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124706.

[4] O. A. Johnson and A. C. Affam, "Petroleum sludge treatment and disposal: a review," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 24, no. 2, pp. 191–201, 2019, doi: <https://doi.org/10.4491/eer.2018.134>.

[5] M. Duan, X. Wang, S. Fang, B. Zhao, C. Li, and Y. Xiong, "Treatment of Daqing oily sludge by thermochemical cleaning method," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 554, no.

June, pp. 272–278, 2018, doi: 10.1016/j.colsurfa.2018.06.046.

[6] Z. H. Wang, L. Zhang, J. X. Li, and H. Zhong, "Disposal of Oily Sludge," *Pet. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 9, pp. 1045–1052, 2015, doi: 10.1080/10916466.2015.1039648.

[7] J. Li *et al.*, "Effects of inherent minerals on oily sludge pyrolysis: Kinetics, products, and secondary pollutants," *Chem. Eng. J.*, vol. 431, no. P3, p. 133218, 2022, doi: 10.1016/j.cej.2021.133218.

[8] X. Jin *et al.*, "Petroleum oil and products recovery from oily sludge: Characterization and analysis of pyrolysis products," *Environ. Res.*, vol. 202, no. March, p. 111675, 2021, doi: 10.1016/j.envres.2021.111675.

[9] B. Singh, S. Singh, and P. Kumar, "In-depth analyses of kinetics, thermodynamics and solid reaction mechanism for pyrolysis of hazardous petroleum sludge based on isoconversional models for its energy potential," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 146, pp. 85–94, 2021, doi: 10.1016/j.psep.2020.08.038.

[10] Z. Wang, Z. Gong, Z. Wang, X. Li, and Z. Chu, "Application and development of pyrolysis technology in petroleum oily sludge treatment," *Environ. Eng. Res.*, vol. 26, no. 1, pp. 1–15, 2021, doi: 10.4491/eer.2019.460.

[11] G. Özsin, E. Apaydın-Varol, M. Kılıç, A. E. Pütün, and E. Pütün, "Pyrolysis of petroleum sludge under non-isothermal conditions: Thermal decomposition behavior, kinetics, thermodynamics, and evolved gas analysis," *Fuel*, vol. 300, no. January, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120980.

[12] C. Valdez, "Tratamiento fisicoquímico de residuos oleosos," Universidad Nacional de Ingeniería, 2011. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.14076/371>

[13] Perúpetro, "Estadísticas Petroleras," 2022. [https://www.perupetro.com.pe/wps/portal/corporativo/PerupetroSite/estadisticas/producción hidrocarburos/producción diaria!/ut/p/z1/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfljo8zi_YxcTTw8TAy93AN8LQwCTUJcvEKADCDfl_1wsAIDHMDRQD8Kt35DHxOofhwKAo3MKNIPUhBFjPvxKlJc771w_ShCSqLw](https://www.perupetro.com.pe/wps/portal/corporativo/PerupetroSite/estadisticas/producción+hidrocarburos/producción+diaria!/ut/p/z1/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfljo8zi_YxcTTw8TAy93AN8LQwCTUJcvEKADCDfl_1wsAIDHMDRQD8Kt35DHxOofhwKAo3MKNIPUhBFjPvxKlJc771w_ShCSqLw) (accessed Feb. 01, 2022).

[14] E. A. Petrovsky, O. A. Kolenchukov, and E. A. Solovyev, "Study of pyrolysis of oil sludge," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 537, no. 3, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/537/3/032082.

[15] Z. Wang *et al.*, "Pyrolysis characteristics and products distribution of petroleum sludges," *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 43, no. 12, pp. 1819–1832, 2022, doi: 10.1080/09593330.2020.1853247.

[16] Z. Li *et al.*, "Probing the essence of strong interaction in oily sludge with thermodynamic analysis," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 187, pp. 84–90, 2017, doi: 10.1016/j.seppur.2017.06.044.

[17] X. Tang, X. Wei, and S. Chen, "Continuous pyrolysis technology for oily sludge treatment in the chain-slap conveyors," *Sustain.*, vol. 11, no. 13, pp. 1–10, 2019, doi: 10.3390/su11133614.

[18] V. Pretell, "Pirólisis Rápida de Biomasa de Palma Africana y Caña de Azúcar para la obtención de Bio-Petróleo," Universidad Nacional de Ingeniería-Perú, 2013. [Online]. Available: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/2042>