

Tiempos de ruptura y regeneración en una torre de adsorción empacada con SiO_2 y Al_2O_3 durante la remoción de $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$ y H_2O de una corriente de C_6H_{12}

Julio Moreno¹, Oscar Urdaneta¹, Humberto Hernandez¹, Édison Alcantara¹ y Edgar Cuicas²

¹Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo Venezuela.

²Departamento Técnico. Planta de PLBD. Poliolefinas Internacionales C.A. Maracaibo Venezuela.

Correo Electrónico: juliomoreno20@gmail.com

Recibido: 15-11-2019

Aceptado: 20-03-2020

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo la estimación de los tiempos de ruptura y regeneración de una columna empacada con unos lechos de SiO_2 y Al_2O_3 para remover H_2O y $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$ de una corriente de C_6H_{12} , usado como solvente en la producción de polietileno lineal de baja densidad. Se consideró para la remoción de H_2O , un lecho de Al_2O_3 con una altura igual a 0,93 m y para remover $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$, un lecho de SiO_2 de 3,3 m de altura. Las capacidades de adsorción para los sólidos fueron cedidos por los fabricantes de los mismos. El tiempo de ruptura de la columna fue de 72 h. El uso de cada uno de los empaques a la ruptura fueron 70,1 y 96,6% para SiO_2 y la Al_2O_3 respectivamente. El tiempo para la purga de las impurezas adsorbidas ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$ y H_2O) fue estimado en 6,5 horas.

Palabras claves: Lecho, ruptura, regeneración y tiempo.

Breakthrough and regeneration time in an adsorption tower packed with SiO_2 and Al_2O_3 during $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$ y H_2O removing from a C_6H_{12} stream

Abstract

The present work had as a main objective the estimation of the breakthrough and the regeneration time for an adsorption tower packed with of SiO_2 and Al_2O_3 to remove H_2O and $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$, from a C_6H_{12} flowrate used as a solvent in the production of low-density lineal polyethylene. It was considered to remove water, a pack of Al_2O_3 with 0.93 m of length; and for removing methyl ethyl ketone one of SiO_2 of 3.3 m of length. The manufacturer of SiO_2 and Al_2O_3 gave each adsorption capacity. The breakthrough time was 72 hours. The percentage of usage for the bed at breakthrough time was in 70.1 and 96.6% for Al_2O_3 and SiO_2 respectively. The regeneration time necessary to purge all the adsorbed impurities ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$ y H_2O) was estimated in 6.5 hours.

Key words: Bed, breakthrough, regeneration and time.

Introducción

Una de las técnicas de producción de polietileno lineal de baja densidad a nivel industrial es aquella en la que usa un solvente como elemento de transporte del polímero en solución [1]. La característica principal de dicho solvente es que el mismo debe ser capaz de disolver el monómero, los catalizadores y el polímero para garantizar el manejo correcto los reactivos y el producto durante el proceso [1]. Otra característica fundamental del solvente es que debe poseer una pureza adecuada, ya contaminantes como especies carbonilo o agua generan la desactivación de las especies catalíticas necesarias para la síntesis del polietileno [1].

La aparición de especies $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$ y H_2O , que envenenan los catalizadores o fomentan problemas durante la polimerización, son en muchos casos generadas durante el proceso mismo de síntesis del

polietileno, y deben ser retiradas del proceso en una etapa de purificación del solvente previo a la etapa de reacción, y de esta manera, garantizar la pureza requerida del mismo para su uso en el proceso de producción [1].

La eliminación de impurezas como el agua puede hacerse a través de adsorción física, ya que la misma, al poseer un momento dipolar, debido a que el oxígeno tiene una densidad de carga negativa, y asociado a los hidrógenos, una densidad de carga positiva [2, 3], esa misma condición de polaridad hace que las moléculas de agua se atraigan entre sí, o entre otros grupos funcionales que contengan H, o grupos OH^- en la estructura superficial de un sólido adsorbente; por medio de una interacción molecular de asociación llamada puente de hidrógeno [2, 3]. Para la $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$, el grupo funcional $\text{R}_2\text{C}=\text{O}$ es un centro para la interacción entre ella y otras estructuras, ya que el enlace polar se comporta como electrófilo en el núcleo de carbono con carga parcial positiva. La insaturación en el enlace carbono-oxígeno, unida a la mencionada polaridad del enlace $\text{C}=\text{O}$ permite la interacción con un nucleófilo, por ejemplo el hidrógeno ubicado en la superficie de un sólido adsorbente, es decir un grupo silanol superficial [3].

Debido a que los sólidos Al_2O_3 y SiO_2 poseen estructuras polares [2, 3] o centros activos, producto de la fractura o las irregularidades en cada una de las estructuras superficiales de los adsorbentes [4, 5], son posibles las interacciones de adhesión entre las moléculas de $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$ y H_2O que son transportadas en la corrientes de proceso, este caso, el C_6H_{12} como solvente y la superficie porosa de los sólidos adsorbentes [5].

Por las razones mencionadas anteriormente, es posible utilizar la operación unitaria de adsorción en una columna empacada con un lecho de Al_2O_3 y SiO_2 para mejorar el sistema actual de purificación de solvente, el cual consta con dos columnas de adsorción empacadas con dos lechos alúmina activada y óxido de silicio cada una y que trabajan de manera alternada, esto es, una en columna en ciclo de proceso y otra en el de regeneración, con la adición de una tercera columna para trabajar en serie con la que está en el ciclo de proceso mientras la otra está en regeneración y así garantizar la pureza requerida del solvente evitando el envenenamiento del catalizador. Adicionalmente, si se garantiza el tiempo correcto de uso del lecho (tiempo de ruptura) y el tiempo necesario para la regeneración del mismo; se podría garantizar aún más la pureza requerida por el solvente, evitando problemas de alta demanda de complejos catalíticos Ziegler-Natta durante la reacción (envenenamiento), y otros temas asociados a desactivación de catalizadores durante la reacción.

Fundamentos Teóricos

1. Adsorción de Gases y Vapores en Sólidos

Cuando un gas o vapor es puesto en contacto con una superficie sólida limpia, algunas moléculas serán adheridas a la superficie en forma de una capa. Generalmente el sólido es llamado adsorbente y el gas o vapor que se adhiere adsorbato [5, 6, 7].

Cualquier sólido es capaz de adsorber cierta cantidad de gas, y dicha cantidad será dependiente de la temperatura, presión y el área de contacto efectiva del material. Los más notables adsorbentes poseen una alta porosidad. La relación a una dada temperatura de equilibrio y la cantidad de gas adsorbido es conocida como isoterma [6, 7]. La adsorción reduce el desbalance de las fuerzas atractivas que existen en la superficie y como consecuencia la energía libre superficial del sistema heterogéneo [6, 7].

2. Adsorción Física

La adsorción física o adsorción de "Van der Waals", fenómeno fácilmente reversible, es el resultado de las fuerzas intermoleculares de atracción entre las moléculas del sólido y la sustancia adsorbida. Por ejemplo, cuando las fuerzas atractivas intermoleculares entre un sólido y un gas son mayores que las existentes entre sí mismo, el fluido se condensará sobre la superficie del sólido, aunque su presión sea menor que la presión de vapor que corresponde a la temperatura predominante. El calor de adsorción es similar al calor de condensación [6 y 7].

3. Operación de Adsorción

Un método muy usado para la adsorción de solutos de líquidos o gases emplea un lecho fijo de partículas granulares. El fluido que se va a tratar se hace descender a través del lecho empacado a una tasa de flujo constante [6, 8].

En el proceso de lecho fijo son importantes las resistencias a la transferencia de masa, ya que el proceso se lleva a cabo en estado no estacionario. La eficiencia del proceso depende de la dinámica global del sistema, y no solo de las consideraciones de equilibrio. Las concentraciones del soluto en la fase fluida y en la fase adsorbente sólida cambian con el tiempo y también con la posición en el lecho fijo conforme prosigue la adsorción. En la entrada del lecho se supone que el sólido no tiene soluto al principio del proceso; a medida que el fluido entra en contacto con la entrada del lecho, se realiza la mayor parte de la transferencia de masa y de la adsorción. Cuando el fluido pasa a través del lecho, su concentración va disminuyendo muy rápidamente con la distancia hasta llegar a cero antes del final del lecho [6, 8].

4. Regeneración del Lecho Gastado (Elución)

La desorción del soluto adsorbido mediante un disolvente se conoce como elución y el disolvente de desorción como el eluyente. El eluido está formado por la corriente efluente que contiene el soluto desorbido y el disolvente de elución [5, 6, 8]. El proceso de regeneración se puede llevar a cabo por [6, 8]:

1.-Elevar la temperatura del lecho hasta el punto de saturación de la especie adsorbida a la presión de operación.

2.-Bajar la presión por debajo del punto de saturación a la temperatura del lecho, logrando la evaporación de la especie desorbida. Hay que agregar calor para evitar la disminución de la temperatura por efecto de evaporación.

3.-Hacer pasar una corriente de gas inerte por el adsorbente manteniendo la presión parcial de gas adsorbido por debajo de la presión de equilibrio del adsorbato en el sólido.

4.- Se puede hacer pasar un gas inerte caliente para lograr vaporizar la especie, manteniendo una presión parcial menor a la de saturación y aprovechando el arrastre.

5. Adsorbedores de Lecho Fijo en Estado no Estacionario

Debido a la inconveniencia y al costo relativamente alto de transportar continuamente partículas sólidas, lo cual es necesario en las operaciones de adsorción en estado estacionario, es más económico hacer pasar la solución que se va a tratar a través de un lecho estacionario de adsorbente. Al aumentar la cantidad de fluido que pasa a través de este lecho, el sólido adsorbe cantidades mayores de soluto y predomina un estado no estacionario. Esta técnica de adsorción se utiliza ampliamente y se aplica en campos tan diversos como la recuperación de vapores de disolventes valiosos a partir de gases, purificación del aire (como en las máscaras de gases), deshidratación de gases y líquidos, decoloración de aceites minerales y vegetales, concentración de solutos valiosos a partir de soluciones líquidas [5, 6, 8].

6. Onda de Adsorción y Punto de Ruptura

Considérese el caso de una solución binaria que contiene un soluto a adsorber, cuando el fluido pasa continuamente a través del lecho profundo del adsorbente, que al principio está libre de adsorbato, la capa superior de sólido, en contacto con la solución adsorbe el soluto rápida y efectivamente; el poco remanente de soluto en la solución queda prácticamente eliminado por las capas en la parte inferior, y el efluente del fondo del lecho está prácticamente libre de soluto. Luego de un periodo de operación, la capa superior del lecho está prácticamente saturada; y mientras continúa fluyendo la solución, la zona de adsorción se mueve hacia abajo como una onda, cuando la parte inferior de la zona de adsorción ha alcanzado el fondo del lecho y la concentración del soluto en el efluente ha aumentado bruscamente hasta un valor apreciable definido por primera vez, se dice que el sistema ha alcanzado el “punto de ruptura” [5, 6, 8].

7. Características superficiales de la Al₂O₃

La composición química superficial de la Al₂O₃ se caracteriza por una alta población de especies Al-O-Al y Al-OH con distintos grados de interacción entre sí [9]. En cuanto a su morfología, la alúmina es un sólido cristalino [4], mesoporoso con una isoterma de adsorción clase IV, según la clasificación BET e histéresis de desorción de tipo A, correspondiente a poros cilíndricos de área transversal bastante uniforme y de radio entre 9 y 29 nm, abiertos por ambos extremos. Su área superficial está alrededor de 130 m²/g, el volumen de poro varía entre 0,47 y 0,56 cm³/g [9, 10, 11, 12].

8. Características superficiales del SiO₂

La superficie de la sílice está cubierta de grupos OH⁻, con distintos grados de interacción y estructuras Si-O-Si. Las interacciones O-H del grupo silanol producen una superficie electronegativa generando sitios ácidos de Brønsted, que aumentan en función del grado de coordinación del grupo. Estos sitios son lugares de fácil interacción con moléculas polares [5]. El área superficial de la sílice oscila alrededor 220 m²/g [5]. Su diámetro promedio de poro está entre 6 y 25 nm. Su isoterma de adsorción está clasificada como tipo II según el método BET, indicando la adsorción primeramente en los poros y luego en la superficie del sólido, su lazo de histéresis corresponde a uno tipo G, típico de poros cónicos cerrados por un extremo [12].

Metodología de Cálculo

En la Tabla 1 se observó que las características principales de la columna de adsorción propuesta para la purificación del solvente C₆H₁₂, las mismas fueron estimadas en un trabajo reportado por Moreno [26], en el cual se hace el dimensionamiento de la columna de adsorción considerada en este trabajo.

Tabla 1. Características de la Columna Propuesta

Diámetro (m)	Altura Al ₂ O ₃ (m)	Altura SiO ₂ (m)	Masa Al ₂ O ₃ (kg)	Masa SiO ₂ (kg)	Tiempo de contacto Al ₂ O ₃ (s)	Tiempo de contacto SiO ₂ (s)	Temperatura de adsorción (°C)	Velocidad del fluido (m/s)
1,8	0,93	3,3	1800	6000	42	149	60	0,02

En la Tabla 2 se presentan las características de los dsorbentes utilizados en la columna de adsorción para el proceso de remoción de C₄H₈O y H₂O de la corriente de C₆H₁₂ usado como solvente.

Tabla 2. Características de los adsorbentes

SiO ₂						
Densidad (kg/m ³)	Capacidad de adsorción (kg/kg)	Diámetro de partícula (mm)	Fracción vacía (ε)	Área por volumen de empaque (m ² /m ³)	Capacidad calorífica (kj/kgK)	Diámetro de poro (nm)
720	0,08	4	0,35	760	0,92	18
Al ₂ O ₃						
Densidad (kg/m ³)	Capacidad de adsorción (kg/kg)	Diámetro de partícula (mm)	Fracción vacía	Área por volumen de empaque (m ² /m ³)	Capacidad calorífica (kj/kgK)	Diámetro de poro (nm)
750	0,27	4	0,25	1123	1,1	24

1. Curva de Ruptura (Breakthrough)

Para la estimación de la curva de ruptura, se usará el método gráfico reportado por Hougen y Marshall [15]. Ver Figura 1.

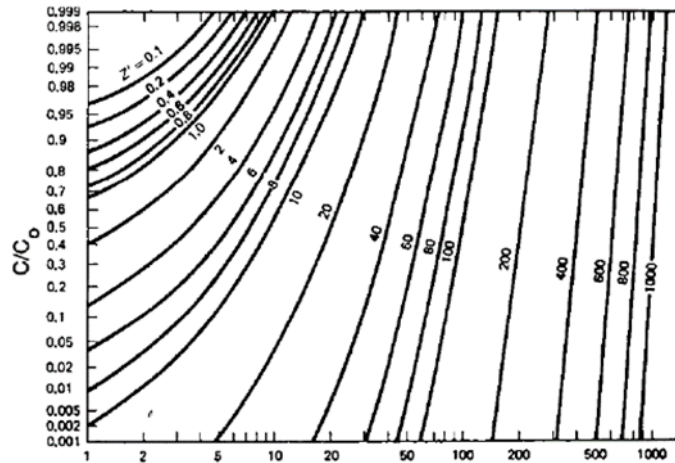


Figura 1. Relación de concentración (Co/Ci), en el efluente [15].

Para usar la Figura 1 y calcular el tiempo de ruptura, se deben determinar los parámetros longitud de lecho Z' (ecuación 1), y el parámetro tiempo τ (eje X de la Figura 1) descrito en la ecuación 2. [15]

$$Z' = \left(\frac{K_g a}{V_f} \right) * Z \tag{1}$$

$$\tau = \frac{kg_i a_i}{Kd_i \rho_i} \left(t - \frac{Z}{\frac{v_f}{\epsilon}} \right) \tag{2}$$

$$Kd_i = \frac{Q_{oi}}{\frac{m_i}{Q}} \tag{2.1}$$

El uso de los lechos en el punto de ruptura ($C_i/C_o=0,2$) y a la saturación total ($C_i/C_o= 1$), se puede determinar por las ecuaciones 3 y 4. La eficiencia en el uso del lecho para el proceso de purificación de solvente se obtiene por medio de la ecuación 5.

$$I_{0,2} = F_{impurezas} * t_{ruptura} \tag{3}$$

$$I_1 = Q_o * X \tag{4}$$

$$\eta = \frac{I_{0,2} * 100}{I_1} \tag{5}$$

2. Premisas para el Proceso de Regeneración

El proceso de regeneración de los lechos de Al_2O_3 y SiO_2 se hará con nitrógeno como agente de elusión, tomando en cuenta la adsorción de Van der Waals de las impurezas y las características típicas de la regeneración presentadas en la Tabla siguiente [15].

Tabla 3. Condiciones para la regeneración

Temperatura de lecho saturado (°C)	60
Temperatura de lecho a regenerar (°C)	120
Temperatura de lecho regenerado (°C)	60
Presión de regeneración (bar)	1,4
Temperatura del N ₂ en regeneración (°C)	150
Velocidad de regeneración m/seg	0,16

La velocidad de regeneración se determinará por la ecuación siguiente

$$Vd = kga * \frac{(Z * A_f) * (1 - \varepsilon)}{g_i} \quad (6)$$

El tiempo de regeneración (etapa de purga) se puede estimar por:

$$tr = \frac{I_{ads}}{Vd} \quad (7)$$

4. Algunas Investigaciones Relacionadas con la Estimación del Punto de Ruptura de Manera Teórica (Revisar porque no hay tres)

Hori y colaboradores [28] realizaron estudios de punto de ruptura en lechos de carbón activado en una columna de 20 mm de diámetro interno y 240 mm de altura, con un flujo descendente de benceno en aire. En dicha investigación, los autores presentaron la siguiente ecuación para determinar el punto de ruptura al 50%

$$t_{50} = \frac{\rho_b * q_0}{v * c_o} * Z_0 \quad (8)$$

Donde:

ρ_b es la densidad del lecho (g/cm³), Z_0 corresponde a la altura del lecho (cm), c_o es la concentración de del adsorbato (g/cm³), v es la velocidad superficial (cm/s) y q_0 es la capacidad de adsorción. Para determinar el 10% del punto de ruptura los autores proponen la siguiente correlación:

$$t_{50} = \frac{\rho_b * q_0}{v * c_o} * \left(Z_0 - \frac{Za}{2} \right) \quad (9)$$

Za es igual a la altura de la zona de transferencia.

En esa misma investigación, los autores realizan una comparación de los datos para el punto de ruptura determinados experimentalmente y los generados por las correlaciones 22 y 23, obteniendo resultados similares y concluyendo que las ecuaciones anteriores reproducen el comportamiento con bastante asertividad. Inclusive, son propuestas para determinar puntos de rupturas en adsorción en lechos fluidizados.

En el mismo orden de ideas, Jonas y Rherman [29] determinaron un modelo teórico modificando la ecuación de Wheeler originalmente derivada de las ecuaciones de continuidad y balances de materiales, incorporando la capacidad de adsorción y la constante de velocidad de adsorción (K_a); permitiendo la predicción por medio de cálculos matemáticos el punto de ruptura de un lecho en servicio.

Las pruebas fueron realizadas en un equipo con carbón activado como adsorbente con un diámetro de partícula 12-30 mesh, con un área superficial de 1000 m²/g con C₃H₉O₃P, como adsorbato de

referencia y después de ejecutar las pruebas los investigadores propusieron la siguiente ecuación para determinar el punto de ruptura:

$$t_{50} = \frac{W_e * \rho_b * \ln \frac{C_o}{C_i}}{K_a * C_o} \quad (10)$$

La ecuación 24 tiene como variables ρ_b es la densidad el lecho en g/cm³, C_0 es la concentración del adsorbato g/cm³ K_a y W_e , son la constante de la cinética de adsorción y la capacidad de adsorción cinética respectivamente.

En el caso de las dos últimas variables (K_a y W_e), y luego del análisis de los datos hecho por los autores Jonas y Rherman concluyen que la constante cinética de adsorción y la capacidad cinética de adsorción pueden ser aproximados al coeficiente global de transferencia para la fase gaseosa (K_g), y la capacidad lineal de adsorción con un error no mayor al 2%. Las ecuaciones utilizadas para calcular K_a y W_e están descritas en el trabajo de Dubinin [29]. El modelo de Thomas fue aplicado por Han y colaboradores [30] para modelar la curva de ruptura de la adsorción de azul de metileno. Ver ecuación (25). K_a es el coeficiente global de transferencia de masa para la adsorción, C_a es la capacidad de adsorción.

$$\frac{C_o}{C_i} = \frac{1}{1 + \left(e^{\left(\frac{K_a * C_a}{Q} - k_a * C_o * t \right)} \right)} \quad (11)$$

Wu y Han [35], en su investigación titulada Biosorption of 2,4-dichlorophenol from aqueous solutions by immobilized *Phanerochaete chrysosporium* biomass in a fixed-bed column, aplicaron el modelo de Thomas encontrando buena concordancia entre los datos experimentales y los reproducidos por el modelo a partir de relaciones C_o/C_i mayores a 0,3.

Adicionalmente, aplicaron el modelo Bohart Adams encontrando un comportamiento inverso, dicho modelo reproduce los valores experimentales en la zona inicial de la curva de ruptura. En la misma investigación [35], se estiman las constantes de velociada (k_L) y las capacidades de adsorción, para el proceso de adsorción y recomienda el su uso del parámetro cinético al momento de realizar simulaciones para el proceso de escalamiento. La ecuación de Bohart Adams ha sido utilizada para determinar el tiempo de servicio y la altura de lecho (si se hace t igua a 0), dados los parámetros C_o , C_i , Z , No , v y k_a [36].

$$t = \frac{No * Z}{Co * v} - \frac{1}{Ka * Co} * \ln \left[\frac{Co}{Ci} - 1 \right] \quad (12)$$

No : Capacidad de adsorción. Z : Altura de lecho. C_i , C_o : concentración a la entrada del lecho y a la salida del lecho respectivamente. v : velocidad de flujo.

Existe una correlación presentada por Asa [36] para estimar la zona de transferencia Z_a :

$$Z_a = \frac{Co * v}{\rho_b * Qo} * (t_e - t_b) \quad (13)$$

t_e y t_b son los tiempos de ruptura y final. Q_o es la capacidad de adsorción del sólido.

5. Características de operación para la columna de adsorción propuesta

Luego de la estimación de los parámetros de tiempo de operación y tiempo de regeneración, dada la columna descrita en las Tablas 1 y 2 [13], en la Tabla 6; se encuentran las tres características principales.

Tabla 4. Condiciones de Operación

Tiempo de operación (días)	3
Tiempo de regeneración (horas)	3
Flujo de regeneración (m/s)	8 veces la velocidad del flujo de proceso

5.1 Comparación entre una Columna Actual y la Columna Propuesta

En la siguiente Tabla (7) se hace la comparación entre las condiciones de operación típicas de una columna de adsorción propuesta en este trabajo, y las establecidas para la columna de adsorción similar usada actualmente para purificar el C_6H_{12} usado como solvente [14 y 26].

En dicha Tabla se observó la concordancia entre las características de una columna de adsorción similar presentada por Moreno en su investigación [13]; y las obtenidas por la metodología de cálculo aplicada en esta investigación. La única discrepancia existente se encuentra en el valor del ciclo de regeneración, dicha diferencia se puede atribuir a la incertidumbre de las correlaciones utilizadas para la estimación de la duración de la etapa de purga [14, 15], aunque dicha discrepancia se puede considerar despreciable desde el punto de vista ingenieril.

Tabla 5. Comparación entre las Condiciones de Operación típicas y determinadas

Parámetro	Actual	Propuesta
Ciclo de adsorción	72 horas	72 horas
Ciclo de regeneración	6 horas	7 horas

5.2. Consideraciones para la Determinación del Punto de Ruptura y la Etapa de Regeneración en una Columna de Adsorción

El éxito en el diseño de una columna de adsorción requiere la predicción acertada del perfil de concentración en el efluente como una función del tiempo [30, 35], y si bien el procedimiento de cálculo del tiempo de ruptura y el de regeneración utilizados en este trabajo fue de alto valor, ya que los mismos son una herramienta para la predicción del comportamiento de la columna cuando se modifican variables básicas como flujo de proceso, tipo de isoterma de adsorción (tipo de adsorbente), es obligatorio el diseño del proceso de adsorción a partir de datos de laboratorio [15].

En este mismo orden de ideas, McCabe y colaboradores [14] indica que a pesar de la cantidad de trabajos publicados relacionados con la predicción de perfiles de concentración y alturas de unidades de transferencia, las correlaciones para la transferencia de calor y masa poseen un alto grado de incertidumbre; y refuerza al igual que Walas [15] que los adsorbedores deben ser dimensionados a partir de datos de laboratorio.

Pan [31] comparó el coeficiente de transferencia de masa obtenido por medio de pruebas de laboratorio con el determinado por el uso de las correlaciones basadas en los número adimensionales de Re , Sh y Pr ; y aunque presentan una buena asertividad en la predicción del coeficiente de transferencia de masa, la diferencia encontrada entre ambos valores fue igual al 21%. Esto reforzaría lo expresado por Walas y McCabe [14 y 15] acerca de la incertidumbre generada en la aplicación de correlaciones de transferencia de masa y de calor, que debe ser minimizada con el dimensionamiento de adsorbedores a partir de datos de laboratorio.

6. Estudios Futuros

Para continuar con el proceso de diseño y puesta en operación de la columna de adsorción propuesta, se deben validar los datos obtenidos en este trabajo por medio de pruebas de laboratorio para garantizar el correcto dimensionamiento de la columna de adsorción para la purificación de C_6H_6 . También es recomendable ajustar los datos a un modelo, por ejemplo al modelo de Thomas [33 y 34], para determinar el K_g de proceso y compararlo con el determinado teóricamente en esta investigación, para tratar de dilucidar la incertidumbre de los modelos aplicados y ampliar el espectro de esta investigación [15, 30 y 31].

Conclusiones

Se estimó el tiempo de ruptura y de regeneración en 72 y 7 horas respectivamente para una columna de adsorción propuesta, cargada con 1800 kg de Al_2O_3 y 6000 kg de SiO_2 , utilizando métodos descritos en la literatura, de fácil uso y aplicable a otros procesos de adsorción.

En líneas generales, el método para el cálculo del punto de ruptura propuesto por Hougen y Marshall [15], así como el modelo de transferencia de masa aplicado para la estimación de los tiempos de ruptura y regeneración, presentaron una alta asertividad ya que sus resultados fueron similares al compararlos con el los tiempos de regeneración y servicio de una columna de adsorción similar ya existente [13].

De llevarse a cabo la instalación de la propuesta de mejora. Es decir, la columna de adsorción adicional tal y como está descrita en las Tablas de la 1 a la 5, se podría obtener una reducción sustancial en los costos de producción de polietileno lineal de baja densidad [13].

Referencias Bibliográficas

- [1] Rubin. *Materiales Plásticos, Propiedades y Aplicaciones*. 1ra edición Limusa S.A., 2004.
- [2] Hidelbrand and Powel *Principles of Chemistry*. 7ma Macnamillan Company, 1965.
- [3] Reynold. *Reaction of Organic Compounds*. 1ra Edición Wiley Toppan, 1962.
- [4] Coria, I. Variación de las propiedades superficiales a altas temperaturas en óxidos de metales de transición soportados en alúmina, para su utilización en reacciones catalíticas que involucren adsorción de gases. *Invenio* 14 (26), 141-154, 2011.
- [5] Julio Moreno. Efecto de la temperatura de calcinación de la sílice en el sistema Pt/CeO₂/SiO₂ para la oxidación de metano. Trabajo especial de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela, 2011.
- [6] Treybal. *Operaciones de Transferencia de Masa* 2da Edición Mc Graw Hill. (1988).
- [7] Shaw. *Introduction to Colloid & Surface Chemistry*. 4ta Edición Butterworth Heinemann, 1992.
- [8] Geankoplis. *Procesos de Transferencia y Operaciones Unitarias* 3ra Edición Cecsca, 1998.
- [9] Rodriguez, J., Villaquiran, C., Cobo, J. Estudio de la formación de complejos intermedios durante la síntesis de alúmina. *Material Research* 4 (4), 255-264, 2001.
- [10] Da Costa, M., Ferrer, V., Sánchez, J., Zárraga, J., Finol, D. Preparación y caracterización de un óxido mixto Ce/Tb para su uso en catalizadores TWC. *Rev. Tec. Ing. Zulia* 32 (3), 256-265, 2009.
- [11] Del Toro, R., Gutierrez, B., Diaz, Y., Gonzalez, I., Betancourt, P., Brito, J. Eliminación de contaminantes orgánicos persistentes mediante hidrot ratamiento catalítico. *Catálisis* 2 (1), 14-25, 2013.
- [12] Martín. *Adsorción de Gases y Vapores por Carbones*. 1ra Edición Universidad de Alicante, 1990.
- [13] Martinez y Rus. *Operaciones de Separación en Ingeniería Química. Métodos de Cálculos*. 1ra Edición Pearson Prentice Hall, 2004.
- [14] McCabe, Smith and Harriot. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 4ta Edición. McGraw Hill, 1956.

- [15] Walas. Chemical Process Equipments Selection and Design. 1ra Edición. Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering, 1990.
- [16] García C., Chavez G. Sistema Cu⁺⁺- Na⁺ Dowex 50W-X8 en lecho fluidizado. Rev. Tec. Ing. Zulia 7 (1), 29-37, 1984.
- [17] Bird, Stewart and Lightfoot. Fenómenos de Transporte. 2da Edición. Ediciones Repla, S.A, 1992.
- [18] Himmelblau, Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química. 6ta Edición. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A, 1997.
- [19] Levenspiel. Flujo de Fluidos e Intercambio de Calor. 1ra Edición. Editorial Reverté, S.A, 1993.
- [20] Ried C., Prausnitz J., Poling B. Properties of Gases and Liquids. 2 da Edición McGraw-Hill, 1987.
- [21] Hottel C., Noble J., Sarofim A., Silcox G., Wankat P., Knaebel K. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 8va Edición. McGraw-Hill, 2008
- [22] Bennett C., Myers J. Momentum, heat and Mass Transfer. 2da Edición TMH Edition, 1975.
- [23] Çengel Y., Boles M. Termodinámica. 4ta Edición Mc Graw Hill, 2002.
- [24] Montano J., Arias H., Cadavid F. Metodología para el cálculo de la distribución de temperatura transitoria en un regenerador térmico de lecho poroso. Rev. Fac. Ing. Universidad de Antioquia 41, 66-83, 2007.
- [25] Ricardo Mejia. Planteamiento de un modelo teórico de cálculo para regeneradores térmicos. Trabajo especial de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, 2000
- [26] Julio Moreno. Propuesta de mejoras al sistema de purificación de solvente/comonomero en una planta de polietileno lineal. Trabajo especial de grado. Facultad de ingeniería, Universidad Rafael Urdaneta, 2006.
- [27] Hajime H., Tanaka I., and Akiyama T. Breakthrough time on activated carbon fluidized bed adsorber. JAPCA. 38 (3), 269-271, 1988.
- [28] Jonas L., Rehermann J. Predictive equations in gas adsorption kinetics. Carbon. 11, 59-64, 1973.
- [29] Han R., Wang Y., Zhao X., Wang Y., Xie F., Cheng C., Tang M. Adsorption of methylene blue by phoenix tree leaf powder in a fixed-bed column: experiments and prediction of breakthrough curves, Desalination. 245, 284-297, 2009.
- [30] Pan B., Meng F., Chen X., Pan B., Li X., Zhang W., Zhang X., Chen J., Zhang Q., Sun Y. Application of an effective method in predicting breakthrough curves of fixed-bed adsorption onto resin adsorbent. Journal of Hazardous Materials. 124, 74-80, 2005.
- [31] Brauch V., Schlünder E. The scale-up of activated carbon columns for water purification, based on results from batch test-II, Chemical engineering science, 30, 539-548, 1975.
- [32] Singh S., Tonnsend T., Mazyck D., Boyer T. Equilibrium and intra-particle diffusion of stabilized landfill leachate onto micro- and meso-porous activated carbon. Water research. 41, 491-499, 2011.

- [33] Samarghandi M., Hadi M., McKay G. Breakthrough Curve Analysis for Fixed-Bed Adsorption of Azo Dyes Using Novel Pine Cone-Derived Active Carbon. *Science & Technology*. 32, 791-806, 2014.
- [34] Wu J., Yu H. Biosorption of 2,4-dichlorophenol from aqueous solutions by immobilized *Phanerochaete chrysosporium* biomass in a fixed-bed column. *Chemical Engineering Journal*. 138, 128-135, 2008.
- [35] Sankararamakrishnan N., Kumar P., Singh Chauhan V. Modeling fixed bed column for cadmium removal from electroplating wastewater. *Separation and Purification Technology*. 63, 213-219, 2008.
- [36] Miura A. Determination of Cesium Adsorption Breakthrough Curves Using Carbonized Rice Hull and Beech Sawdust as Adsorbents. *Environment and Ecology Research* 5(6), 461-466, 2017.

