



**MODELO FENOMENOLÓGICO QUE DESCRIBE EL PROCESO DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS EMPLEANDO MEMBRANAS DE ZEOLITA NATURAL**  
**PHENOMENOLOGICAL MODEL DESCRIBING THE PROCESS BIOGAS PURIFICATION USING NATURAL ZEOLITE MEMBRANES**

L. Ortega-Viera<sup>1\*</sup>, A. Crespo-Artigas<sup>1</sup>, J. Gandón-Hernández<sup>1</sup>, S. Rodríguez-Muñoz<sup>2</sup>, E. Fernández-Santana<sup>1</sup>, J. M. Ameneiros- Martínez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” Cujae, Calle 114, No. 11901, entre Rotonda y Ciclovía, Marianao CP 19390, La Habana, Cuba.

<sup>2</sup>Centro de Estudios de Ingeniería de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” Cujae, Calle 114, No. 11901, entre Rotonda y Ciclovía, Marianao CP 19390, La Habana, Cuba.

Recibido 13 de Agosto de 2015; Aceptado 7 de Abril de 2017

**Resumen**

Actualmente en Cuba, se trabaja en una nueva vía para la purificación de biogás mediante el empleo de membranas de zeolita natural. En el estudio se realiza la síntesis de 10 membranas a partir de valores diferentes de masa de óxido de zinc. Con la operación del sistema se alcanzan porcentajes de remoción entre 53 y 100%, siendo los valores más elevados cuando las membranas tienen mayor masa de ZnO(s). El cálculo del número de Knudsen permite conocer el mecanismo de difusión que ocurre en las membranas, siendo la de Fick, lo que posibilita realizar el cálculo del flujo específico de H<sub>2</sub>S(g) que se transfiere en las membranas.

*Palabras clave:* biogás, membranas, modelos fenomenológicos, purificación, sulfuro de hidrógeno.

**Abstract**

Currently in Cuba, working on a new way for the purification of biogas by using natural zeolite membranes. In the study 10 synthesis membranes made from different mass values zinc oxide. System operation with removal percentages between 53 and 100% are achieved, with the higher values when the membranes have greater mass of ZnO (s). The Knudsen number calculation allows knowing the diffusion mechanism that occurs in the membranes, being the Fick, which allows the calculation of the specific flow of H<sub>2</sub>S (g) is transferred to membranes.

*Keywords:* biogas, membranes, phenomenological models, purification, hydrogen sulphide.

## 1 Introducción

El agotamiento de los combustibles fósiles y los graves efectos medioambientales que ha provocado su uso, trae consigo que las fuentes renovables de energía se hayan convertido en una de las más utilizadas a nivel mundial. El empleo de fuentes de energía renovable es hoy una necesidad de desarrollo que garantiza no solo la producción de combustible, sino en numerosos casos la eliminación del vertido de cargas contaminantes agresivas al medio ambiente y este es el caso de la obtención de biogás (Siefes, 2010; Youngsukkasem y col., 2013).

La utilización de este tipo de combustible tiene un gran número de beneficios ya que es un recurso

renovable, las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera como metano (CH<sub>4</sub>(g)) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>(g)) disminuyen. En su obtención se utilizan como materias primas, materiales que son considerados como desperdicios y los residuos del proceso productivo, pueden ser aprovechados como fertilizantes para los suelos. A pesar del gran número de ventajas y posibilidades de empleo del biogás, este presenta como desventaja que el sistema de almacenamiento se dificulta y de alto valor debido a las impurezas que presenta (CO<sub>2</sub>(g) y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S(g))) (Beil y Hoffstede, 2010; Cuesta y col., 2010; Weiland, 2010; Varnero y col., 2012;

\* Corresponding author. E-mail: lortega@quimica.cujae.edu.cu

Morero y Campanella, 2013).

Un exceso de  $\text{CO}_2(\text{g})$  provoca un aumento de la temperatura, dando lugar al calentamiento global, el deterioro del medio ambiente y el cambio climático. Por su parte, el  $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$  es corrosivo y provoca afectaciones a los seres humanos. En la literatura consultada, se reportan diferentes valores como límite máximo permisible (LMP) para el  $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$ . En particular, la norma mexicana establece como LMP 0.1% volumétrico (NOM-137-SEMARNAT, 2003).

En la actualidad existen diversos métodos para la eliminación del  $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$  presente en el biogás, los cuales se agrupan de la siguiente manera: métodos físico - químicos, métodos biotecnológicos y separación por membranas (Rodríguez, 2009; Basu y col., 2010; Varnero y col., 2012; Valdés-Parada y col., 2014). La selección de uno u otro método depende de los resultados del análisis técnico-económico que se realice.

Los métodos físico-químicos se clasifican en métodos de adsorción y absorción utilizando compuestos químicos inorgánicos y orgánicos. De manera general, sus desventajas fundamentales implican altos costos de inversión, los primeros por la adquisición de adsorbentes y los segundos por la importación de reactivos, además de tener en contra de su uso, la humedad del clima en Cuba, sobre todo en aquellos que utilizan hierro y las altas presiones requeridas por los de despojamiento con agua; por tanto, estos métodos no están al alcance de países en vías de desarrollo (Rodríguez, 2009; Varnero y col., 2012).

Por otro lado, los métodos biotecnológicos poseen una serie de ventajas sobre los métodos físico - químicos como son: alta eficiencia, menor costo de inversión y operación; ya que utilizan equipos sencillos y de bajo consumo de reactivos. Sin embargo, para que el proceso de purificación a escala industrial sea más competitivo, es necesario buscar nuevos microorganismos que disminuyan los tiempos de residencia (Rodríguez, 2009).

Teniendo en cuenta la necesidad del empleo de fuentes renovables de energía y las limitaciones de los métodos existentes para la purificación del biogás, la aplicación de tratamientos como las tecnologías de membranas emergen como alternativas a los actuales tratamientos de purificación. En los estudios más recientes realizados en la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" Cujae, se alcanzan resultados satisfactorios en la remoción de  $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$  empleando membranas conformadas a

partir de zeolita natural. Es por ello que se plantea como objetivo de este trabajo: obtener el modelo fenomenológico que describe la purificación de biogás empleando membranas de zeolita natural.

## 2 Materiales y métodos

### 2.1 Materias primas

Para la síntesis de las membranas se emplea zeolita natural con fase predominante Clinoptilolita, óxido de zinc, carbón vegetal y etilenglicol según se muestra en la tabla 1.

### 2.2 Operaciones para la síntesis de las membranas y el sistema de purificación del biogás

El procedimiento empleado para la síntesis de las membranas tiene los siguientes pasos: Estudio del proceso de conformación de las membranas, a partir de las experiencias previas. Proceso de molienda de las diferentes materias primas hasta obtener la granulometría deseada en cada caso. Tamizado de las mismas, hasta alcanzar el tamaño de partículas necesario y deseado. Pesado y mezclado de la materia prima y el óxido de zinc. Prensado de las diferentes mezclas de zeolita natural, con el carbón vegetal primario y el óxido de zinc. Tratamiento térmico para la combustión del carbón y el establecimiento de los poros en la estructura de las membranas. Proceso de purificación del biogás, utilizando las membranas obtenidas a diferentes concentraciones. Caracterización del biogás, antes y después de ser tratado, determinando la composición de  $\text{CH}_4(\text{g})$ ,  $\text{CO}_2(\text{g})$  y  $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$  (Fig. 1).

Para la purificación del biogás se emplea un sistema experimental (Fig. 2), que cuenta con una bolsa de nailon STEDIM de 50 L de capacidad a temperatura ambiente y 101,3 kPa, que contiene biogás obtenido a partir de heces de ganado vacuno. Esta bolsa (B1) fue conectada a un sistema cerrado, conformado por un soplador (S), un rotámetro (F) (marca Gracco Gear Assy G3000. Meter-Part Number 239-716 (5-230 L/h)), un soporte para las membranas (SM), válvulas (V) y un conjunto de 6 bolsas (B2) de nailon STEDIM de 1 L (temperatura ambiente y 101,3 kPa). Para las conexiones se emplean mangueras de silicona y presillas, garantizando la hermeticidad del sistema.

Tabla 1. Composición de las membranas de zeolita natural

Membranas	Masa de zeolita (g)	Masa de ZnO(s) (g)	Masa de carbón (g)	Etilenglicol (mL)
<b>(Dpc &lt; 0,067) mm</b>				
1	19,00	0,00	1,00	2,70
2	18,21	0,79	1,00	2,70
3	17,42	1,58	1,00	2,70
4	16,63	2,37	1,00	2,70
5	15,84	3,16	1,00	2,70
<b>(0,067 &lt; Dpc &lt; 0,13) mm</b>				
6	19,00	0,00	1,00	2,70
7	18,21	0,79	1,00	2,70
8	17,42	1,58	1,00	2,70
9	16,63	2,37	1,00	2,70
10	15,84	3,16	1,00	2,70

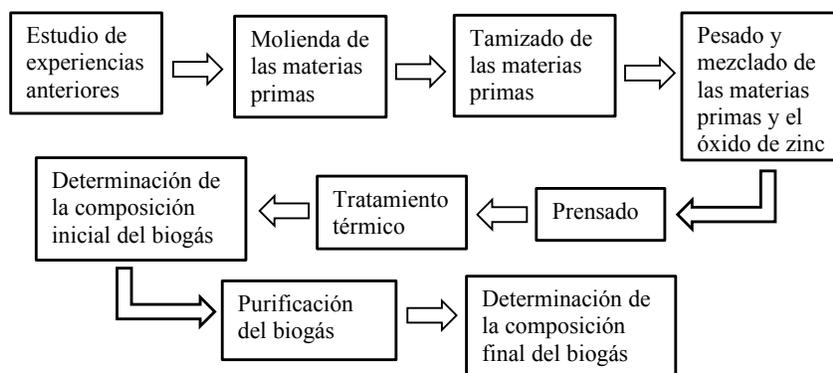


Fig. 1. Diagrama de flujo para la síntesis de las membranas

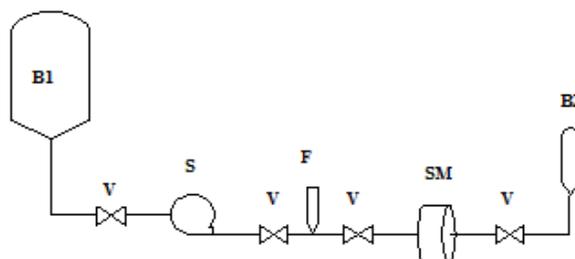


Fig. 2. Esquema del sistema experimental empleado en la purificación del biogás a escala de laboratorio.

En este sistema, las membranas se colocan en el interior del soporte. Una vez realizadas todas las conexiones y selladas, se abre la válvula

para que circule el biogás. Antes de comenzar el proceso de purificación, se procede a determinar la concentración de CH<sub>4</sub>(g), CO<sub>2</sub>(g) y H<sub>2</sub>S(g) inicial

y una vez concluido, se realiza la determinación de CH<sub>4</sub>(g), CO<sub>2</sub>(g) y H<sub>2</sub>S(g) final presente en el biogás recolectado en las seis bolsas.

### 2.3 Aplicación de las ecuaciones de transferencia de masa

En la difusión de gases en sólidos porosos, se pueden identificar tres tipos de mecanismos de difusión (Geankoplis, 2003; Webb, 2006):

- Difusión de gases de Knudsen: Tiene lugar cuando  $N_{Kn} \geq 10$
- Difusión de gases en la región de transición: Ocorre si  $0.01 \leq N_{Kn} \leq 10$
- Difusión molecular de gases o de Fick: Se presenta cuando  $N_{Kn} \leq 0.01$

Para identificar el tipo de difusión que tiene lugar en la membrana es necesario determinar el número de Knudsen ( $N_{Kn}$ ), a partir de la Ec. 1 (Geankoplis, 2003; Webb, 2006).

$$N_{Kn} = \frac{\lambda}{2\bar{r}} \quad (1)$$

Donde:

$\lambda$  : Trayectoria libre media (distancia promedio que una molécula de gas recorre antes de chocar con otra) (m).

$\bar{r}$ : Radio promedio de los poros (m), determinado a partir de un Microscopio Electrónico de Barrido de la marca TESCAN, modelo 5130 SB con analizador de rayos X marca OXFORD INSTRUMENTS, modelo INCA 350.

La trayectoria libre media puede ser calculada mediante la Ec. 2.

$$\lambda = \frac{3.2\mu}{P} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} \quad (2)$$

Siendo:

$\mu$ : Viscosidad de la mezcla gaseosa (Pa·s)

$P$ : Presión del sistema (N/m<sup>2</sup>)

$T$ : Temperatura del sistema (K)

$M$ : Masa molar de la mezcla gaseosa (kg/kmol)

$R$ : Constante de los gases ideales y es igual a  $8.31 \times 10^3$  (N·m/kmol·K)

En función del tipo de difusión que tenga lugar en la membrana se utiliza una expresión diferente para el cálculo del flujo específico del componente que se transfiere.

Para el caso de la difusión de Knudsen, se pueden utilizar las Ecs. (3)-(4) (Geankoplis, 2003; Treybal,

2001), para el cálculo de la difusividad de Knudsen ( $D_{KA}$ ) y del flujo específico, respectivamente.

$$D_{KA} = 97 \cdot \bar{r} \sqrt{T/M_A} \quad (3)$$

$$N_A = \frac{D_{KA} \cdot P}{R \cdot T \cdot L} \cdot (x_{A1} - x_{A2}) \quad (4)$$

Donde:

$L$ : Altura o espesor de la membrana (m).

$x_{A1}$  y  $x_{A2}$ : Fracciones molares del componente a transferir en la entrada y salida de la membrana, respectivamente (-).

Cuando la difusión de gases tiene lugar en la región de transición se puede utilizar la Ec. 5 (Geankoplis, 2003):

$$N_A = \frac{D_{AB} \cdot P}{\alpha \cdot R \cdot T \cdot L} \cdot \ln \frac{1 - \alpha \cdot x_{A2} + D_{AB}/D_{KA}}{1 - \alpha \cdot x_{A1} + D_{AB}/D_{KA}} \quad (5)$$

Donde:

$D_{AB}$ : Es la difusividad molecular del H<sub>2</sub>S(g) en la mezcla gaseosa (m<sup>2</sup>/s)

$\alpha$ : Es el factor de relación de flujo

A continuación se muestra el desarrollo matemático para obtener la ecuación que permite calcular el flujo de H<sub>2</sub>S(g) transferido, si la difusión que tiene lugar es del tipo de Fick. Considerando la membrana como un cuerpo plano con transporte de A en Z, se emplea la ecuación de continuidad para el componente A, mostrada en la Ec. 6.

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rN_{Ar}) + \frac{1}{r} \frac{\partial N_{A\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial N_{Az}}{\partial z} = R_A \quad (6)$$

$\frac{\partial C_A}{\partial t} = 0$ . Porque se considera estado estacionario

$\frac{\partial}{\partial r} (rN_{Ar}) = \frac{\partial N_{A\theta}}{\partial \theta} = 0$ . Porque la difusión solo tiene lugar en la dirección principal de flujo (z)

$R_A = 0$ . Porque no ocurre reacción química (Bird y col., 2007)

Al realizar las simplificaciones se obtiene que:  $\frac{\partial N_{Az}}{\partial z} = 0$ .

Lo que significa que es constante en la dirección z.

A partir de la Ley de Fick se obtienen las Ecs. (7)-(8):

$$N_{Az} = -C \cdot D_{AB} \cdot \frac{\partial x_A}{\partial z} \quad (7)$$

$$N_{Az} = -D_{AB} \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} \quad (8)$$

Despejando e integrando la Ec. 8 se obtienen los resultados mostrados en las Ecs. (9)-(14):

$$\frac{\partial C_A}{\partial z} = -\frac{N_{Az}}{D_{AB}} \quad (9)$$

$$\partial C_A = -\frac{N_{Az}}{D_{AB}} \partial z \quad (10)$$

$$\int_{C_{Ai}}^{C_{As}} \partial C_A = -\frac{N_{Az}}{D_{AB}} \int_0^L \partial z \quad (11)$$

$$(C_{As} - C_{Ai}) = -\frac{N_{Az}}{D_{AB}} L \quad (12)$$

$$N_{Az} = -\frac{D_{AB}(C_{As} - C_{Ai})}{L} \quad (13)$$

$$N_{Az} = \frac{D_{AB}(C_{Ai} - C_{As})}{L} \quad (14)$$

Donde:

$C_{Ai}$ : Concentración de  $H_2S(g)$  en la entrada de la membrana ( $kmol$  de  $A/m^3$ )

$C_{As}$ : Concentración de  $H_2S(g)$  en la salida de la membrana ( $kmol$  de  $A/m^3$ )

Finalmente, la Ec. 14 será la que exprese el flujo específico de  $H_2S(g)$  transferido para cuando se cumple la ley de Fick.

En el desarrollo matemático anterior se aplicó la ley de Fick considerando a la membrana como un sólido homogéneo; sin embargo, las membranas obtenidas, son sólidos porosos que tienen canales o espacios vacíos interconectados que afectan a la difusión. Por esto es conveniente tener en cuenta la porosidad y tortuosidad de las membranas; para lo cual se combinan estos términos en una expresión de difusividad efectiva (Ec. 15) (Benítez, 2002; Geankoplis, 2003; Treybal, 2001; Webb, 2006), obteniéndose por tanto, para el cálculo del flujo específico de  $H_2S(g)$  que se transfiere, la Ec. 16.

$$D_{Aefect} = \frac{\varepsilon}{\tau} \cdot D_{AB} \quad (15)$$

$$N_A = \frac{D_{Aefect}(C_{Ai} - C_{As})}{L} \quad (16)$$

Donde:

$D_{Aefect}$ : Difusividad efectiva del  $H_2S(g)$  en el medio poroso ( $m^2/s$ )



Fig. 3. Membranas de zeolita natural para la purificación del biogás.

### 3 Resultados y discusión

#### 3.1 Síntesis de las membranas y operación del sistema

Las membranas de zeolita natural obtenidas tienen como promedio diámetro de 50.4 mm ( $\pm 0.5$  mm) y espesor de 6,4 mm ( $\pm 0.04$  mm) (Fig. 3).

En la operación del sistema se obtienen porcentajes de remoción de  $H_2S(g)$  entre 53 y 100%, siendo la concentración inicial de  $H_2S(g)$  igual a 0.178%, correspondiendo los mayores valores, a las membranas que contienen mayor cantidad de  $ZnO(s)$  en su composición.

Los autores consideran que el comportamiento descrito anteriormente está causado por la ocurrencia de una reacción química entre el  $ZnO(s)$  y el  $H_2S(g)$  (Ec. 17).



Además, en las membranas de zeolita natural ocurre también el fenómeno de adsorción en las paredes de los poros debido a que la zeolita es un material adsorbente.

#### 3.2 Modelo fenomenológico que describe el proceso de purificación

A partir de las ecs. (1)-(16), se calcula la cantidad de  $H_2S(g)$  que se transfiere según el modelo fenomenológico, que permite describir el proceso

de purificación de biogás empleando membranas de zeolita natural. Del sistema estudiado se conoce que la temperatura es 25°C (298K) y la presión es 101.3 kPa (1 atm).

Primeramente se calcula la trayectoria libre media según la Ec. 2, conociendo que la masa molar y viscosidad del biogás son: 26.35 kg/kmol y  $1.38 \times 10^{-5}$  Pa · s, respectivamente, se obtiene que  $\lambda = 5.36 \times 10^{-8}$  m y con ella se conoce el tipo de difusión que ocurre en las membranas, para lo cual es necesario determinar el número de Knudsen (Ec. 1). Los resultados para las 10 membranas se muestran en la tabla 2.

Como se observa en la tabla 2, el radio promedio de los poros ( $\bar{r}$ ), varía entre 2.68 y  $2.73 \times 10^{-6}$  m, por lo que el diámetro de los poros se encontrará entre  $5.36$  y  $5.46 \times 10^{-6}$  m. Debido a esto, se puede afirmar que todas las membranas tienen una estructura macroporosa, según Mulder (2004); Silva (2006); Webb (2006); Sotto (2008), ya que el tamaño de los poros es superior a  $50 \times 10^{-9}$  m. Por tanto, con las membranas obtenidas se puede efectuar la operación de microfiltración, pues en la literatura consultada (Benito y col., 2004; Casis y col., 2010; Sondergeld y col., 2010) se plantea que esta es la que ocurre cuando el tamaño de los poros es superior a  $0.1 \times 10^{-6}$  m.

Además, en la tabla 2 se aprecia que es menor el diámetro de los poros en las membranas de zeolita natural con mayor masa de ZnO(s) y que para una misma masa de ZnO(s), es mayor cuando aumenta

el diámetro de las partículas de carbón vegetal. Estos resultados confirman las consideraciones realizadas por los autores, al atribuir la formación de los poros en las membranas a la presencia del carbón vegetal.

Los valores que se reportan en la tabla 2, indican que en todas las membranas, tiene lugar la difusión molecular de gases o de Fick, ya que el número de Knudsen es menor que 0.01. Teniendo en cuenta que apenas hay variación en el radio de los poros, el número de Knudsen, se mantiene aproximadamente constante. Por tanto, el cálculo del flujo específico de H<sub>2</sub>S(g) que se transfiere, se realiza a partir de la Ec. 16. En la misma se expresa la relación entre el flujo específico de H<sub>2</sub>S(g) que se transfiere con respecto a la difusividad efectiva del H<sub>2</sub>S(g) en el medio poroso, la diferencia de concentraciones del H<sub>2</sub>S(g) en la entrada y la salida y a su vez, es inversamente proporcional al espesor de la membrana; de manera tal que, el flujo específico de H<sub>2</sub>S(g) que se transfiere se favorece al disminuir el espesor de la membrana.

Los resultados se observan en la tabla 3, tomando los valores de difusividad efectiva del H<sub>2</sub>S(g) en las membranas y concentración final de H<sub>2</sub>S(g) en el biogás, que aparecen en la misma.

Según se reporta en la tabla 3, la difusividad efectiva disminuye en la medida que la masa de ZnO(s) aumenta y para un mismo valor, es mayor cuando el diámetro de las partículas de carbón vegetal aumenta.

Tabla 2. Número de Knudsen ( $N_{Kn}$ )

Membranas	Masa de ZnO(s) (g)	Dpc (mm)	$\bar{r}$ (m) $\times 10^6$ ( $\pm 0.2$ )	$N_{Kn}$ (-)
1	0	< 0.067	2.72	0.0098
2	0.79	< 0.067	2.71	0.0098
3	1.58	< 0.067	2.70	0.0099
4	2.37	< 0.067	2.69	0.0099
5	3.16	< 0.067	2.68	0.0099
6	0	0.067-0.13	2.73	0.0098
7	0.79	0.067-0.13	2.72	0.0098
8	1.58	0.067-0.13	2.71	0.0098
9	2.37	0.067-0.13	2.70	0.0099
10	3.16	0.067-0.13	2.69	0.0099

Tabla 3. Flujo específico de H<sub>2</sub>S(g) que se transfiere

Membranas	Masa de ZnO(s) (g)	Dpc (mm)	c(H <sub>2</sub> S(g)) <sub>f</sub> (%)	Remoción de H <sub>2</sub> S(g) (%)	Def . 10 <sup>6</sup> (m <sup>2</sup> /s)	NA . 10 <sup>12</sup> (kmol/s.m <sup>2</sup> )
1	0	< 0.067	0.077	56.74	2.64	1.2
2	0.79	< 0.067	0.034	80.9	2.63	1.71
3	1.58	< 0.067	0.015	91.57	2.63	1.93
4	2.37	< 0.067	0	100	2.63	2.11
5	3.16	< 0.067	0	100	2.62	2.1
6	0	0.067-0.13	0.083	53.37	2.66	1.14
7	0.79	0.067-0.13	0.042	76.4	2.66	1.63
8	1.58	0.067-0.13	0.024	86.52	2.65	1.84
9	2.37	0.067-0.13	0.018	89.89	2.65	1.91
10	3.16	0.067-0.13	0.011	93.82	2.64	1.99

Este comportamiento se debe a que la difusividad efectiva no solo depende de las propiedades de los gases, sino también de las características estructurales porosidad y tortuosidad (Ec. 15), disminuyendo cuando decrece la porosidad y aumenta la tortuosidad, ya que se dificulta el paso del biogás por el medio poroso. Este resultado coincide con lo reportado en la literatura (Álvarez y col. (2001)), en la que se plantea que la difusividad efectiva es una propiedad importante en la predicción del coeficiente de transferencia de masa que depende de las características estructurales del medio poroso.

En la tabla 3 se observa que al aumentar la masa de ZnO(s) utilizada en la síntesis de las membranas de zeolita natural, aumenta el flujo de H<sub>2</sub>S(g) que se transfiere en las mismas, y que para una misma masa de ZnO(s) en las membranas, los mayores valores de flujo específico de H<sub>2</sub>S(g) corresponden a las que tienen menor diámetro de partículas de carbón vegetal en su composición siendo la excepción cuando la membrana contiene 2,37 g de ZnO(s) y el menor diámetro de las partículas de carbón vegetal. Esto se debe al comportamiento de las características estructurales y la difusividad efectiva, en las membranas. Además, en resultados anteriores (Ortega y col. (2015)) se reporta que los mayores porcentajes de remoción de H<sub>2</sub>S(g), se alcanzan cuando aumenta la masa de ZnO(s) en las membranas. Por tanto, se sugiere para la operación del sistema, trabajar con la membrana de zeolita natural de 2,37 g de ZnO(s) y el menor diámetro de partículas de carbón vegetal, ya que permitiría ahorros en el consumo de ZnO(s) en la síntesis de las membranas.

### 3.3 Remoción de otros compuestos presentes en el biogás

Antes de comenzar y al concluir la operación del sistema, se realiza la caracterización del biogás, siendo la remoción promedio de CH<sub>4</sub>(g) y CO<sub>2</sub>(g), igual a 1,10% (± 0.003) y 15.50% (± 0.06). Los resultados indican que prácticamente no se remueve CH<sub>4</sub>(g) al tratar el biogás, aspecto muy favorable pues, este componente es el que aporta el valor calórico que posee dicha fuente de energía. Por otro lado, los valores que se observan para la remoción de CO<sub>2</sub>(g), no sorprenden a los autores de este trabajo pues, prácticamente todos los métodos de purificación de biogás que se conocen, no solo remueven H<sub>2</sub>S(g), sino también CO<sub>2</sub>(g) según se establece en la literatura (Fernández, 1999; Fernández, 2004). De esta forma, se logran también, disminuir los efectos no deseados que provoca la presencia de CO<sub>2</sub>(g) en el medio ambiente o al almacenar el biogás.

## Conclusiones

El empleo del biogás como fuente de energía ofrece ventajas económicas, sociales y medioambientales sobre los restantes combustibles no renovables. Para emplear la misma de forma sustentable se debe lograr su purificación, especialmente dirigida a la eliminación o reducción del contenido de sulfuro de hidrógeno, además del dióxido de carbono. El empleo de membranas de zeolita natural muestra resultados satisfactorios en la remoción de H<sub>2</sub>S(g), obteniendo los mayores porcentajes de remoción, cuando las membranas tienen mayor masa de ZnO(s). Se ha

demostrado que la difusión en dichas membranas ocurre mediante la ley de Fick, ya que el número de Knudsen tiene un valor menor que 0.01, permitiendo calcular el flujo específico de  $H_2S(g)$  que se transfiere en estas, según la Ley de Fick, obteniéndose valores en el intervalo entre 1,20 y  $2,11 \cdot 10^{-6}$  kmol/s.m<sup>2</sup>. Además, se remueve también  $CO_2(g)$  al emplear las mismas, resultado satisfactorio en este estudio.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de varios compañeros del Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), ellos son Aramís y Yordanis, por su colaboración en la molienda y tamizado de las materias primas. Además, el apoyo brindado por los estudiantes de 5to año de la carrera de Ingeniería Química, Anayancy y Víctor, en el trabajo experimental.

## Referencias

- Álvarez, A. R., Solís, J. A., Durán, C. (2001). Coeficientes de difusividad aparente durante la extracción de aceite de almendras de zapote mamey. *Tecnología y Ciencia Ed. IMIQ 16*, 1, 20-27.
- Basu, S., Khan, A. L., Cano, A., Liu, Ch., Vankelecom, I. (2010). Membrane-based technologies for biogas separations. *Chemical Society Reviews 39*, 750-768.
- Beil, M. y Hoffstede, U. (2010). Guidelines for the implementation and operation of biogas upgrading systems. BIOGASMAX-Integrated Project. No. 019795 Unión Europea. Disponible en: [www.biogasmax.eu](http://www.biogasmax.eu). Consultado: 11 diciembre 2014.
- Benitez, J. (2002). *Principles and Modern Applications of Mass Transfer Operations*. 2da Edición. Editorial JOHN WILEY & SONS, INC., Estados Unidos.
- Benito, J. M., Conesa, A., Rodríguez, M. A. (2004). Membranas cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio 43*, 5, 829-842.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N. (2007). *Fenómenos de transporte*. 2da Edición. Editorial Reverté, S.A., España.
- Casis, N., Fidalgo, M. M., Ravaine, S., Estenoz, D. A. (2010). Elaboración de membranas porosas a partir de cristales coloidales. *Información Tecnológica 21*, 1, 3-8.
- Cuesta, M. J., Martín, F., Vicente, G. y Villar, S. (2010). Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento. *Informe de Vigilancia Tecnológica*. España.
- Fernández, E. (1999). Metodología de bajo costo para disminuir la concentración del  $H_2S(g)$  en el biogás. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cuba.
- Fernández, E. (2004). Procedimiento para la purificación de Biogás, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, publicación cu 23003, Oficina de Propiedad Intelectual Cubana, Cuba. 18 p.
- Geankoplis, C.J. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles*. 4ta Edición. Editorial Pearson Education Inc., Estados Unidos.
- Morero, B., Campanella, E. A. (2013). Simulación del proceso de absorción química con soluciones de aminas para la purificación de biogás. *Información Tecnológica 24*, 1, 25-32.
- Mulder, M. (2004). *Basic Principles of Membrane Technology*. 2da Edición. Editorial Kluwer Academic Publishers, Holanda.
- NOM-137-SEMARNAT (2003). Contaminación atmosférica-Plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos- Control de emisiones de compuestos de azufre. Norma Oficial Mexicana. México, 2003.
- Ortega, L., Rodríguez, S., Fernández, E., Bárcenas, L. (2015). Principales métodos para la desulfuración del biogás. *Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental XXXVI*, 45-56.
- Rodríguez, S. (2009). Alternativas de desulfuración de efluentes gaseosos basadas en métodos biológicos. Tesis para optar por el título de Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Estudios de Ingeniería de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" Cujae, La Habana, Cuba.

- Siefers, A. (2010). A novel cost-effective hydrogen sulphide removal technology using tire derived rubber particles. Tesis de grado para optar por el título de Ingeniero Civil. Universidad Estatal de Ciencia y Tecnología de Iowa, Estados Unidos.
- Silva, F. J. (2006). Membranas asimétricas de fibra hueca en el proceso de deshidratación del gas natural. Tesis de maestría en Ingeniería de Gas. Facultad de Ingeniería, Universidad de Zulia, República Bolivariana de Venezuela.
- Sondergeld, C. H., Ambrose, R. H., Rai, C. S., Moncrieff, J. (2010). Microstructural studies of gas shales. Paper SPE 131771. 23-25 Febrero. Pittsburgh, Pennsylvania: *SPE Unconventional Gas Conference Held*.
- Sotto, A. (2008). Aplicación de la tecnología de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos. Tesis doctoral. Departamento de Tecnología Química y Ambiental, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España.
- Treybal R. (2001). *Operaciones con Transferencia de Masa*. 2da Edición. Editorial McGraw-Hill, México.
- Valdés-Parada, F. J., Ochoa, J. A., Salinas, E., Gómez, S., Hernández, M. G. (2014). Upscaled model for dispersive mass transfer in a tubular porous membrane separator. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 13, 1, 237-257.
- Varnero, M., Carú, M., Galleguillos, K. y Achondo, P. (2012). Tecnologías disponibles para la purificación de biogás usado en la generación eléctrica. *Información Tecnológica* 23, 2, 31-40.
- Webb, W., Bear, J. (2006). *Theory and Applications of Transport in Porous Media*. Editorial Springer, Israel.
- Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology* 85, 849-860.
- Youngsukkasem, S.; Barghi, H.; Rakshit, S.K.; Taherzadeh, M.J. (2013). Rapid biogas production by compact multilayer membrane bioreactor: Efficiency of synthetic polymeric membranes. *Energies* 6, 6211-6224.