

MODELO DEL GEL POLARIZADO

UN ANALISIS CRITICO

VICTOR FERNANDEZ*

* INSTITUTO CUBANO DE INVESTIGACIONES DE LOS DERIVADOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR (ICIDCA)

Resumen

Uno de los modelos más utilizados en ultrafiltración es el conocido como Modelo del Gel Polarizado. En el presente trabajo se analiza este modelo y se discuten las principales contradicciones que han aparecido en su aplicación a los datos experimentales.

Abstract

The Gel Polarized Model is one of the most used models in Ultrafiltration practice. In this paper, the model is analyzed and the main contradictions, which have appeared in modelling the experimental data, are discussed.

Introducción

Muchos son los investigadores que se han dedicado a estudiar la ultrafiltración como operación unitaria y los principales esfuerzos han estado encaminados a encontrar las leyes que describen este proceso y a determinar la factibilidad tecnológica de esta operación en algunas tecnologías.

Muchas investigaciones han tenido por objetivo buscar la relación entre el flujo de permeado y la concentración de la solución, lo que permitiría predecir el monto de la inversión para un caso dado.

El modelo propuesto, que más aceptación ha tenido, es el conocido como *Modelo del Gel Polarizado*,¹⁻⁴ el cual ha sido muy utilizado para tratar de describir la operación.

Modelo del Gel Polarizado

Cuando una solución fluye a través de un conducto formado total o parcialmente por membranas, el solvente pasa a través de esta y el soluto es rechazado, este último comienza a acumularse sobre el medio

filtrante hasta una concentración tal que se produce un transporte difusivo desde la membrana hacia el seno de la solución. Este fenómeno es conocido como polarización de la concentración, el cual se pone de manifiesto en los procesos de transferencia de masa a través de una barrera semipermeable¹.

En el caso específico de la ultrafiltración, las membranas no solo son permeables ante el solvente sino que también dejan pasar solutos de pequeño tamaño molecular, mientras que las macromoléculas son retenidas por la membrana.

A medida que las macromoléculas se van acumulando sobre el medio filtrante, se forma una capa de sólidos que además de producir caídas en el flujo de permeado, debido a la formación de una nueva resistencia hidráulica, disminuye el *cut-off* de la membrana.

Otros fenómenos que afectan la caída del flujo

Porter⁵ ha planteado que la resistencia al flujo de permeado se debe únicamente a

la capa de gel formada y que la absorción de sólidos sobre la superficie de la membrana no tiene gran incidencia sobre las caídas de flujo. Apoya esta idea en el resultado práctico de que los flujos de permeado se recuperan con sólo pasar agua a través del sistema sin necesidad de hacer uso de agentes químicos o *back-flushing* (que eliminaría los sólidos absorbidos).

No debe perderse de vista que la absorción es un resultado de la interacción solución-membrana y las condiciones de operación, por lo que parece arriesgado subestimar los efectos de este fenómeno a priori.

Muchos autores han reportado la existencia del fenómeno de absorción durante su trabajo⁶⁻¹⁰ y se han reportado estudios sobre los factores que pudieran disminuir sus efectos^{6,10,11}.

Para algunos casos particulares se ha podido determinar⁹ que el tiempo en que se alcanza un flujo constante es de 30 a 50 *min*, de donde se concluyó que este era el tiempo necesario para que el gel se desarrollara totalmente. Sin embargo, Howell et al.⁹ después de resolver la ecuación de continuidad para transferencia de masa, calcularon que el tiempo necesario para alcanzar el 90% del valor de C_g era menor de 5 *min* y que las posteriores caídas de flujo son a causa de la absorción de sólidos sobre la membrana. Aún más, durante largos tiempos de operación el flujo disminuyó constantemente sin que se alcanzara el valor constante una vez desarrollado completamente el gel. Otra explicación que se ha dado a esta caída de flujo le achaca este comportamiento a una compactación y posterior polimerización de los sólidos que lo forman, con lo que parte de los sólidos que al inicio pasaban libremente a través de la membrana, ahora serán retenidos.

En una operación continua, donde la concentración de la solución a procesar se mantiene constante, la concentración de la capa de sólidos sobre la membrana irá aumentando hasta alcanzar un valor que hace que el flujo de sólidos desde el seno de la solución hasta la membrana sea igual al flujo de sólidos desde la membrana hasta la solución. Si se tiene en cuenta que esto último debe cumplir la ley de Fick, entonces se puede plantear un balance de sólidos.

$$JC = D \frac{dc}{dx} + C_p J$$

donde

- J: flujo de solvente.
- C: concentración de la solución
- D: difusividad del soluto
- C_p : concentración en el permeado

entonces

$$J(C - C_p) = D \frac{dc}{dx}$$

Si se establecen adecuadamente las condiciones de frontera es muy fácil resolver esta ecuación diferencial. Sea λ el espesor de la subcapa laminar que separa la solución de la capa de sólidos o gel. Entonces

$$\text{para } x = \lambda \quad C = C_b$$

$$\text{para } x = 0 \quad C = C_g$$

C_b y C_g designan las concentraciones de la solución y del gel respectivamente.

Ahora, la ecuación anterior puede escribirse de la forma

$$J \int_0^\lambda dx = D \int_{C_g}^{C_b} \frac{dc}{(C - C_p)}$$

que integrando queda

$$J = - \frac{D}{\lambda} \ln C_g/C_b$$

pero D/λ es el coeficiente de transferencia de masa, entonces:

$$J = - K \ln C_g/C_b$$

Esta expresión ha sido utilizada en numerosas ocasiones^{1,2,3,13 y 14} con buenos resultados.

Como puede apreciarse, en esta ecuación aparecen dos parámetros importantes, K y C_g , los cuales serán analizados brevemente.

Parámetro K

De la ecuación (1) puede verse que se considera que el coeficiente de transferencia de masa es constante durante la operación isotérmica. Sin embargo, generalmente en el gráfico de J v.s. $\ln C_b$ se observa cierta concavidad hacia arriba, lo que ha motivado que se consideren dos valores

de K en todo el rango de concentraciones¹⁵. No se ha fundamentado que sean dos y no otra cantidad cualquiera. Ante esto se ha planteado que la concavidad observada se debe a cambios en la velocidad del fluido y la viscosidad y no a que varíe la difusividad⁵.

Por otra parte, se ha planteado¹⁶ que para el cálculo de K se deben considerar dos valores de difusividad (en el gel y en la solución) y se han propuesto ecuaciones semiempíricas que toman en cuenta estos dos valores. Con esto se trata de introducir la fuerte dependencia que existe entre la difusividad y la concentración¹⁷. Esta dependencia hace que el coeficiente de transferencia de masa cambie con la concentración de la solución, sobre todo cuando se trabaja en régimen laminar, lo que pudiera representar una contribución a los cambios de pendiente observados en el gráfico de J v.s. $\ln C_b$. Los que sí no parece acertado es generalizar la afirmación de que el coeficiente de transferencia de masa no depende de la concentración de la solución¹⁸.

Tampoco puede perderse de vista las variaciones que se introducen con cambios en la viscosidad, producto de cambios en la concentración de la solución.

En las expresiones utilizadas para el cálculo de K, los investigadores tampoco han unificado criterios.

Porter⁵ propone, por ejemplo, una expresión derivada de la ecuación de Lévêque²⁰ para transferencia de calor.

$$K = 0,02 Q^{0,8} D^{0,67} / b W^{0,8} \nu^{0,47}$$

donde:

- Q: flujo de solución
- D: difusividad de la solución
- b: altura del canal de flujo
- W: ancho del canal
- ν : viscosidad cinemática

También se ha propuesto el uso de la ecuación de Gilliland-Sherwood para el cálculo de K^{20} .

$$Sh = 0,023 Re^{0,88} Sc^{0,33}$$

Por otra parte, Nakao et al¹² proponen la derivación obtenida por Deissler²¹ de la ecuación de Gilliland-Sherwood para altos valores del número de Schmit.

$$Sh = 0,023 Re^{0,875} Sc^{0,23}$$

Valor de C_g

Ingham²² interpretó este valor como la concentración de soluto que crearía una presión osmótica opuesta al flujo de permeado, tal que este se anula.

Algunos autores han descrito esta capa formada sobre la membrana como una zona de una concentración tal de sólidos que la solución se comparta como un gel y no fluye.

Se han encontrado valores diferentes de C_g obtenidos como el intercepto en el eje X del gráfico de J v.s. $\ln C_b$, utilizando la misma solución. También, en algunos casos se encontraron valores de concentración tan bajos que no permitieron suponer la existencia de un gel y en otros, valores superiores al 100% en peso⁷.

Los valores bajos de concentración, además de echar por tierra la supuesta existencia de un gel, desacredita también la interpretación de Ingham, pues son pequeñas las presiones osmóticas ejercidas por las macromoléculas en solución.

Algunos defensores del modelo⁵ plantean que el valor de C_g es fijo para una solución dada pero que puede variar en espesor y porosidad.

A medida que mayor sea la concentración de la solución, por cada unidad de solvente que atraviesa la solución, mayor será la cantidad de sólidos que llegue hasta la superficie de la membrana. De esta forma, para alcanzar el estado de equilibrio sobre el que se apoya el modelo del gel, es necesario que el gradiente de concentración sea mayor, por lo que mayor deberá ser la concentración de la capa de gel. Además, el flujo que circula a lo largo de la membrana pudiera arrastrar sólidos de esta capa, por lo que a mayor velocidad de recirculación, mayor debe ser este arrastre. Es decir, debe esperarse que tanto la concentración de la solución como la velocidad de recirculación deben incidir en el valor de C_g .

Nakao et al¹² no sólo corroboraron experimentalmente estas suposiciones sino que además pudieron determinar que el valor de C_g también depende de la geometría del sistema, lo que los llevó a afirmar que el intercepto en el eje X del gráfico de J v.s. $\ln C_b$ no tiene interpretación y de ahí que no sea C_g . Esta afirmación conduce directamente a una revisión del modelo, pues en la deducción de la ecuación (1) el

valor de este intercepto tiene una interpretación física que no admite ambigüedades. También se ha postulado la posible oclusión de poros de la membrana por los sólidos presentes en la solución, lo que también afecta su permeabilidad^{23,24,25}.

Conclusiones

- Por todo lo planteado pudiera pensarse que el modelo del gel polarizado encierra en sí tantas inexactitudes que debía desecharse como posible descripción matemática del fenómeno de Ultrafiltración. Por esta razón, se han propuesto otros modelos, la mayoría de los cuales se caracterizan por una complejidad tan grande que a menos que se utilice la computación, no puede hallarse su solución.
- El análisis de estos modelos se escapa de los objetivos del presente trabajo, pero ninguno de ellos alcanza la sencilla elegancia del modelo bajo análisis que, a pesar de todo, se ajusta con buena aproximación a los resultados experimentales obtenidos.

Bibliografía

1. S. A. Michaels: *Chem. Eng. Progress*, 64 (12), 1968.
2. R. P. Baker, H. Strathmann: *Journal of Polymer Science*, 14, 1970, 1197.
3. W. F. Blatt: *Memb. Sci. Technol.* Plenum Press, New York, 1970.
4. R. P. de Filippi, R. L. Goldsmith: *Memb. Sci. Technol.*, Plenum Press, New York, 1970.
5. M. C. Porter: *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Develo.* 11(2), 1972.
6. M. S. Le, J. A. Howell: *Comprehensive Biotechnology*. Pergamon Press, 1982.
7. K. Yamauchi: *Dissertation Abstracts International, Science and Technology*, 43, 1983.
8. K. K. Pei, M. Chegan: *Journal of Food Sci.* 48 (4), 1983.
9. J. A. Howell: *Annals of the New York Academy of Science*. 369, 1981.
10. A. Suki, A. B. Fano: *J. of Memb. Sci.* 27, 1986.
11. V. Werin, M. Cheyan: *J. Food Process.* 4, 1980.
12. S. Nakao, T. Nomura y S. Kimura: *AICHE Journal*, 25 (4), 1979.
13. M. López: Tesis de pre-grado. ISPJAE, 1987.
14. V. Fernández, M. Otero, J. Romano: Trabajo (no publicado).
15. M. S. Le, A. Atkinson: *Process Biochemistry*. 26 (2), 1985.
16. J. S. Shen: *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 16 (4), 1977.
17. R. E. Treyball: *Mass Transfer Operation*.
18. R. S. Tuntunjan: *Biotechnology*. 3 (6), 1985.
19. M. A. Léveque: *Ann. MINES*, 13 (4), 1928.
20. H. Niemi, J. Raimoahd y P. Polisaari: *Acta Politécnica Escandinavica*, 174 (1), 1986.
21. R. Deissler: *Analysis of Turbulent Heat. Mass Transfer and Friction in Smooth Tubes at High Prandtl. and Schmidt Numbers*. NACA Rept. 1210, 1955.
22. K. Ingham, T. Bosby: *Ultrafiltration membranes and applications*. Ed. Plenum Press, New York, 1980.
23. T. J. Nisbet, T. M. Thorn, P. J. Wood: *J. Dairy Sci. Technol.* 16, 1981.
24. H. Bauser: *Chemical, H. J. Memb. Sci.* 27, 1986.
25. R. Wakeman, E. Tarleton: *Filtration and Separation*. 5, (4), 1986.