

Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso

José Hernández Rodríguez¹
Pedro Quinto Diez²

¹Universidad de Quintana Roo
Blvd. Bahía s/n Esq. I. Comonfort, Col. Del Bosque
Chetumal, Quintana Roo.

² LABINTHAP

SEPI
ESIME
IPN.

Edif. 5, 3er piso, Unidad Profesional Adolfo López Mateos,
Zacatenco, México, DF.
MÉXICO

Tel. ⁽¹⁾ 01 983 83 50391, ⁽²⁾ 01 5729 6000 ext. 54754

email: ⁽¹⁾ joshema@correo.uqroo.mx
⁽²⁾ pquinto@ipn.mx

Recibido el 5 de febrero de 2004; aceptado el 8 de diciembre de 2004.

1. Resumen

En este trabajo se presenta un análisis de las teorías en uso actualmente aplicadas al estudio del proceso de secado de medios porosos, tomando en consideración sus fundamentos, implicaciones y limitaciones. El objetivo del presente estudio es contribuir a esclarecer los conocimientos más recientes alcanzados en uno de los procesos de mayor importancia para la industria.

2. Abstract (Drying of Porous Mediums: a Theoretical Review of Actual Techniques)

In this work, an analysis of theories nowadays in use applied to the study of drying process of porous mediums is presented, were fundamentals, implications and limits of each theory taken in consideration. The goal of the present study is to contribute to clarify the most recent knowledge reached in one of the most important process for the industry.

Palabras clave: medios porosos, secado, transferencia de calor y masa, deformaciones.

3. Introducción

Los procesos de secado han sido utilizados desde que se descubrió que los alimentos pueden ser preservados por este medio y que algunos materiales, a través del secado, pueden convertirse en buenos materiales estructurales. Actualmente una gran cantidad de productos son secados por diversas razones: preservación, reducción de peso o volumen para su transporte, mejoramiento de su estabilidad dimensional, o como una etapa más de su procesamiento.

La importancia de los procesos de secado se puede apreciar a través de los estudios realizados por Franzen [1], quien en 1987 estimó que a nivel mundial más de 2×10^8 kJ de energía se consumen solamente en el secado de alimentos cada año y, por otro lado, Strumillo [2], en 1995, determinó que 12% del consumo mundial de energía a nivel industrial es destinado a los procesos de secado.

A pesar de que los datos anteriores señalan al secado como uno de los procesos a nivel industrial más empleado, todavía se desconocen muchos aspectos relacionados con las etapas y los mecanismos implicados en el mismo. Esto se debe en gran parte a la complejidad de la estructura de los materiales a secar, porque a nivel microscópico son muy irregulares y complejos, tal y como se observa en la figura 1.

Los primeros intentos realizados para tratar de explicar el proceso de secado, así como los mecanismos que intervienen en el mismo, datan de la primera década del siglo xx. A partir de entonces, han aparecido en la literatura diversas teorías que buscan describir la forma en cómo se desarrolla este proceso. A partir de estas teorías se han originado diferentes modelos matemáticos. Conviene señalar que la mayor parte de tales modelos se han desarrollado con base en el conocimiento empírico, por lo que solo son útiles para describir el proceso de secado de una manera muy global.

Sin embargo, también se ha recurrido a los conocimientos que proporcionan la termodinámica, la mecánica de fluidos y la transferencia de calor, entre otras disciplinas, para plantear modelos que describan al proceso de secado desde un punto de vista más formal.

En estos últimos modelos matemáticos se consideran no solamente las condiciones del medio secante, sino también los

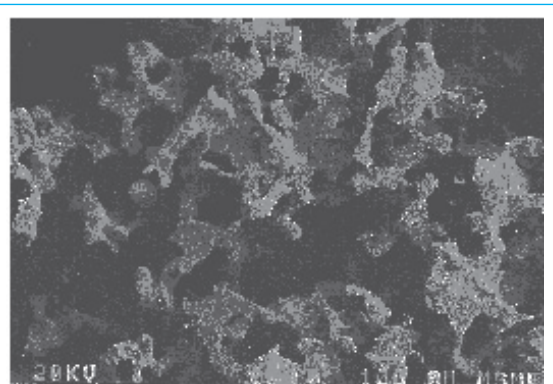


Fig. 1. Imagen de un medio poroso real (piedra arenisca).

mecanismos del movimiento interno de humedad y sus efectos. Esto es porque muchos de los cambios ocurridos al producto durante el secado son internos, como son los cambios de forma y estructura, ruptura, deterioro de proteínas y oxidación de componentes inestables. Estos modelos conducen a sistemas de ecuaciones cuya solución es muy compleja.

Las teorías más simples que se han desarrollado, para explicar el proceso de secado, consideran que sólo existe un mecanismo responsable de la migración de la humedad. Sin embargo, en los modelos más recientes se ha tratado de identificar la influencia de cada mecanismo de transporte de la humedad, durante las diferentes etapas del proceso.

Así que al disponer de esta gran cantidad de información, es difícil identificar cuál es el mejor modelo a usar para describir el proceso de secado de un producto en particular.

Para tratar de contribuir a aclarar esta situación, en este trabajo se hace una revisión a los conocimientos que se tienen actualmente sobre los mecanismos y las etapas del proceso de secado, para con base en esta información hacer una clasificación de los modelos de estudio. Al descartar aquellos modelos basados puramente en el conocimiento empírico, se hace un análisis de las diversas teorías existentes sobre el proceso de secado, señalando en cada caso, sus ventajas, desventajas o limitaciones, así como el grado de aceptación para sus aplicaciones.

4. Desarrollo

4.1 Periodos del proceso de secado

La mayoría de la literatura especializada considera que el proceso de secado se divide en dos periodos, que son: a)

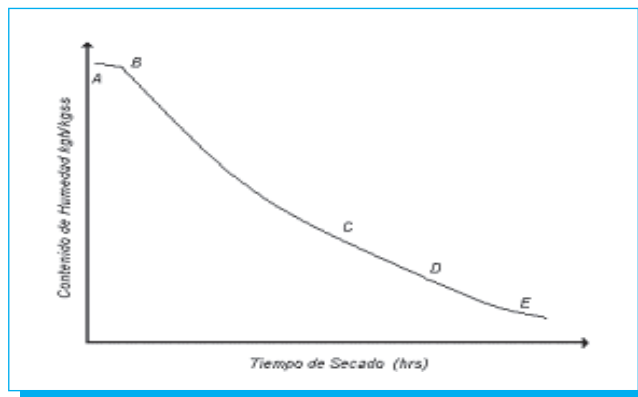


Fig. 2. Etapas del proceso de secado.

periodo de rapidez constante y b) periodo de rapidez decreciente [3]. Actualmente algunos investigadores señalan que cada uno de estos periodos, a su vez, se puede dividir en otras etapas o periodos [4].

En la figura 2 se ilustran los periodos en que se divide el proceso de secado de acuerdo con Keey [4]. Éstos son: A-B periodo de calentamiento, B-C de rapidez de secado constante, C-D primer periodo de rapidez de secado decreciente, D-E segundo periodo de rapidez de secado decreciente.

La duración del periodo de secado de rapidez constante depende de los coeficientes de transferencia de calor y masa, del área expuesta al medio secante, de la geometría de la muestra y de la diferencia de temperaturas y humedades entre la corriente del medio secante y la superficie húmeda del sólido [5].

Cuando se termina el periodo de rapidez constante, se inicia el llamado «periodo de rapidez decreciente». El punto en el cual se tiene el final de un periodo y el inicio del otro se le llama punto crítico o punto de saturación de la fibra del material [6].

Este periodo inicia con una primera etapa de rapidez decreciente, en donde todavía es posible detectar huellas continuas de la humedad en toda la superficie de evaporación (poros). Pero debido a que la superficie evaporativa se reduce por el encogimiento del material, entonces la rapidez de evaporación total de la superficie decrece.

Continuando con el periodo de rapidez decreciente, el plano de vaporización se mueve dentro del sólido, y la rapidez de secado es entonces gobernada por la velocidad de movimiento interno de la humedad. La velocidad del aire, su temperatura y su humedad, tienen menor efecto en el progreso del secado durante este periodo [7].

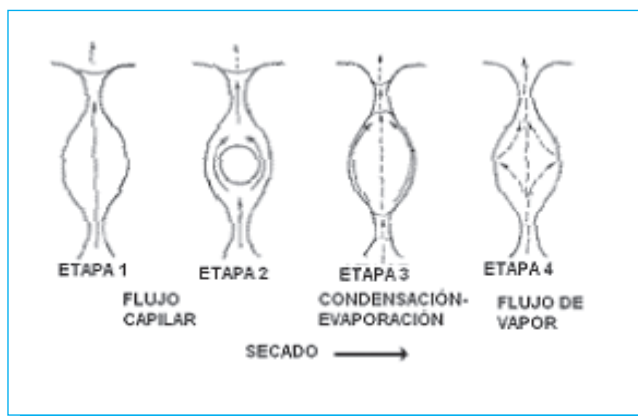


Fig.3. Etapas del movimiento de la humedad en un poro.

En general, en el periodo de rapidez decreciente, la rapidez de secado decrece fuertemente. La humedad se mantiene en los capilares más finos y puede migrar por ascensión capilar a lo largo de las paredes capilares o por evaporación y condensación sucesiva; la presión parcial del vapor de agua disminuye y el encogimiento aún continúa, pero a un ritmo mucho menor que al inicio de este periodo [8].

4.2 Mecanismos de movimiento de la humedad

Para explicar el movimiento de la humedad en un medio poroso durante el secado, en la literatura se pueden encontrar referencias a los siguientes mecanismos de movimiento de la humedad [9]:

1. Difusión líquida: debido a los gradientes de concentración de la humedad.
2. Difusión de vapor: debido a los gradientes de presión parcial del vapor
3. Movimiento de líquido: debido a fuerzas capilares
4. Flujo de líquido o vapor: debido a diferencias en la presión que existe en el interior de los poros y el medio secante.
5. Efusión (Flujo Knudsen): se presenta cuando el camino libre medio de las moléculas de vapor es del orden del diámetro de los poros.
6. Movimiento de líquido debido a la gravedad.
7. Difusión superficial.

En la figura 3 se ilustran los principales periodos de secado, y algunos de los mecanismos que intervienen en la migración de la humedad en un poro. Se considera que el mecanismo de flujo capilar es el que predomina durante el periodo de secado de rapidez constante, mientras que los mecanismos de

condensación- evaporación y flujo de vapor corresponden al periodo de secado de rapidez decreciente [4].

El estudio de estos mecanismos, aplicados al análisis del proceso de secado, ha dado lugar a diferentes teorías, cuya descripción es el objetivo principal de este trabajo.

4.3 Teorías del secado de medios porosos

Desde el punto de vista del desarrollo de las teorías que intentan explicar el transporte de la humedad en los medios porosos, se pueden mencionar los intentos por desarrollar diversos modelos matemáticos de secado, mismos que han surgido del estudio a escala microscópica, macroscópica o experimental.

Entre los modelos microscópicos que se han desarrollado para explicar el proceso de secado, el más representativo es el de la «teoría cinética», el cual se aplica para estudiar la migración de la humedad en un poro o tubo capilar individual.

Los modelos experimentales han surgido para explicar la migración de la humedad en un sólido de forma global. Se basan en el conocimiento empírico y son de aplicación muy específica para un producto en particular, tipo de secador y condiciones de secado. Estos modelos son los más abundantes dentro de la literatura del área de secado, y en ocasiones es posible encontrar dos o tres modelos diferentes para la misma aplicación.

Por otra parte, dentro de los modelos macroscópicos se encuentran los modelos de difusión simultánea de vapor y líquido, destacando los desarrollados por Van Der Zanden (1995) y Kolhapure (1977), los modelos de transferencia simultánea de masa, calor y momentum, sobresaliendo los realizados por Whitaker (1977) y Stanish (1986), y los modelos de termodinámica de procesos irreversibles elaborados por Kowalski (1997) y Luikov (1966) [10].

El desarrollo de un modelo general del proceso de secado se inició a fines de los años 1930, cuando Henry (1939) estudió la difusión de vapor en piezas de algodón. Posteriormente, Philip y De Vries (1957) propusieron un modelo, en el cual tanto los flujos de vapor y líquido fueron considerados y expresados en términos del contenido del gradiente volumétrico de humedad, del gradiente de temperatura y de la contribución gravitacional.

Así, varios conjuntos de ecuaciones a nivel macroscópico han sido propuestas en la literatura para la simulación del proceso de secado en términos de la transferencia de calor y masa en medios porosos. La diferencia fundamental entre estos modelos radica en el número de variables de estado usadas

para describir al medio. Los modelos propuestos se clasifican de la siguiente forma [11]:

- **De una variable:** contenido de humedad (o su equivalente, saturación, potencial del agua, etcétera).
- **De dos variables:** contenido de humedad (o su equivalente) y temperatura (o una variable equivalente: entalpía, etcétera).
- **De tres variables:** contenido de humedad (o su equivalente), temperatura (o su equivalente) y presión del aire en el interior del poro (o una variable equivalente: densidad del aire, densidad de aire intrínseca, etcétera)

Hoy en día, los investigadores usan los modelos de tres variables de estado, que generalmente concuerdan mejor con los resultados experimentales que se han obtenido en laboratorio.

A continuación, se describen brevemente las diferentes teorías en uso para explicar la migración de la humedad en medios porosos durante el proceso de secado.

4.3.1 Teoría de difusión líquida

Lewis, Newman y Sherwood [12] consideraron que el movimiento de humedad durante el secado se debe únicamente al mecanismo de la difusión líquida, por lo que se puede representar el proceso por la ecuación de Fick:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla(K_l \nabla M) \quad (1)$$

La ecuación (1) se ha usado con varias consideraciones, como: coeficientes de difusión constantes, medios isotrópicos, o condiciones de frontera de primer orden.

La teoría de difusión líquida ha ganado preferencia entre los investigadores en el área de alimentos y granos. Algunos de ellos han solucionado la ecuación de difusión para cuerpos regulares. El coeficiente de difusión líquida, K_l , normalmente se asume constante o linealmente dependiente de la temperatura o concentración.

Considerar la difusión líquida como el único mecanismo para el movimiento de humedad conduce a ciertos errores, dado que cuando se comparan los valores calculados por esta teoría y los obtenidos experimentalmente, las discrepancias se hacen evidentes, tal y como ha sido demostrado [5]. Sin embargo, se ha señalado que los resultados podrían tener una mejor correlación si para algunos casos se usaran coeficientes de difusión variables.

La justificación para la aceptación de esta teoría es que la solución de la ecuación de difusión tiene un comportamiento logarítmico similar a las curvas experimentales de secado.

El movimiento de humedad a través de la difusión líquida no puede ser negado, y teorías más sofisticadas retoman la ley de Fick como representativa para el movimiento del líquido y vapor. El problema, entonces, se centra en la consideración de que el movimiento de líquido sea el único mecanismo para la transferencia de humedad en todas las etapas de secado. Aplicar la ecuación de difusión líquida como ecuación general, equivale a asumir la difusión isotérmica, para luego despreciar los gradientes de temperatura dentro del sólido.

Como se ha demostrado a partir de las teorías más recientes, la teoría de difusión no toma en cuenta el encogimiento o endurecimiento del esqueleto del cuerpo sólido, o las isoterms de adsorción. Así, el significado físico del coeficiente de difusión es mal interpretado al considerarse como el resultado simultáneo de varios efectos y, por otra parte, también debe recordarse que es dependiente de la concentración y de la temperatura.

4.3.2 Teoría capilar

La teoría capilar se refiere al flujo de un líquido a través de los intersticios y sobre la superficie de un sólido debido a la atracción molecular entre el líquido y el sólido. Este fenómeno fue analizado primero por Buckingham [13], quien introdujo el concepto de potencial capilar como fuerza conductora para flujo capilar no saturado. La ecuación que describe este fenómeno es:

$$J_l = -K_H \nabla \psi = K_H \rho_s \nabla M \quad (2)$$

En la ecuación 2, el potencial de flujo capilar ψ se considera proporcional al gradiente de concentración de humedad.

Algunos investigadores han señalado que en el secado de sólidos granulares, el flujo de humedad es determinado totalmente por fuerzas capilares por lo que es independiente de la concentración de humedad. Como se ha demostrado a través de experimentos, el flujo de humedad puede ser en la dirección del incremento de concentración, lo cual puede explicarse estableciendo que la fuerza conductora es un gradiente de tensión. El argumento es que tanto las leyes de tensión superficial y del flujo viscoso están basadas en la presión. Solamente para medios homogéneos y fuerzas del cuerpo despreciables, la tensión es proporcional al contenido de humedad.

La humedad alojada en los intersticios de sólidos, así como el líquido que cubre la superficie y el agua libre en las cavidades celulares, están sujetos a movimiento por la gravedad y capilaridad mientras existan caminos o pasajes para la continuidad del flujo.

En el área de secado de alimentos, la teoría de flujo capilar ha sido aceptada como uno de los mecanismos fundamentales, principalmente para la etapa de secado con alto contenido de humedad.

4.3.3 Teoría de condensación- evaporación

El interés por comprender el comportamiento de la humedad en pacas de algodón, llevó al estudio de la difusión de una sustancia a través de otra en los poros de un cuerpo sólido. Aun cuando esta teoría no está limitada al vapor como única sustancia difusiva, la mayoría de los trabajos y los modelos basados en esta teoría consideran que la humedad fluye enteramente en fase gaseosa. Esta teoría, llamada de «Henry» [14], toma en cuenta la difusión simultánea de calor y masa, y asume que los poros forman una red continua de espacios incluidos en el sólido. Además, también asume que la cantidad de vapor varía en forma lineal con la concentración de vapor y temperatura, tal y como se representa por el sistema de ecuaciones siguiente:

- transferencia de masa:

$$\gamma \frac{\partial M}{\partial t} = K_v \nabla^2 M_v - \frac{\partial M_v}{\partial t} \quad (3)$$

- transferencia de calor:

$$\varepsilon \frac{\partial M}{\partial t} = k \nabla^2 T - \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

Posteriormente, con el desarrollo de una teoría para la transferencia simultánea de calor y masa para el segundo periodo de secado en un sólido poroso, se hace la consideración de que las fases líquida y gaseosa del sistema poroso están tan finamente distribuidas desde el punto de vista macroscópico, que el sistema puede tomarse como de una sola fase. Se concluye que el mecanismo de flujo capilar no es el único mecanismo presente al inicio del periodo de rapidez de secado decreciente, sino que también ocurre la transferencia de vapor por difusión. Otros modelos basados en esta teoría, consideran una dependencia lineal entre presión, contenido de humedad y temperatura.

4.3.4 Teoría de Luikov

En el área de secado, Luikov [15] está considerado como el descubridor del fenómeno de difusión térmica y también quien estableció que el gradiente de temperatura es un factor causante de la transferencia de humedad en los materiales.

En el desarrollo de su teoría, Luikov empleó principios de la termodinámica de procesos irreversibles.

Para el caso de transferencia interna de calor y masa en cuerpos capilares porosos, Luikov considera que los flujos debido a la difusión de vapor y difusión líquida están conformados por dos partes: una debida al gradiente de concentración de humedad total, y el otro debido al gradiente de temperatura. Esto queda representado por el siguiente sistema de ecuaciones:

- transferencia de calor:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a' \nabla^2 T + \frac{\varepsilon' L C_m}{c'} \frac{\partial U}{\partial t} \quad (5)$$

- transferencia de masa:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D' \nabla^2 U + D' \delta \nabla^2 T \quad (6)$$

En la ecuación (6), Luikov introdujo el concepto de «potencial de transferencia de masa» U , en analogía al contenido de calor (entalpía en la transferencia de calor), para explicar el porqué cuando diferentes materiales húmedos están en contacto, existe transferencia de masa desde el cuerpo con mayor concentración de líquido al cuerpo con menor concentración de líquido. Así, el potencial de transferencia de masa es función del potencial del contenido de humedad y de la temperatura del sólido.

La introducción del concepto «potencial de humedad», que es un parámetro empírico y no bien comprendido todavía, es el motivo por el cual algunos investigadores tienden a desacreditar la teoría de Luikov.

4.3.5 Teoría de Philip y De Vries

Independientemente de los trabajos de Luikov, Philip y De Vries [16] derivaron un conjunto de ecuaciones que describen la transferencia de calor y humedad en materiales porosos bajo gradientes combinados de temperatura y humedad. Su aproximación básicamente asume que la humedad se mueve tanto por difusión, como por capilaridad. El sistema de ecuaciones que representa esta teoría es:

- transferencia de calor:

$$\rho_s c' \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + L \nabla \cdot (K_v \nabla M) \quad (7)$$

- transferencia de masa:

$$J_1 = K_1 \nabla M \quad (8)$$

Philips y De Vries extendieron su modelo para mostrar separadamente los efectos de los componentes isotérmicos y térmicos de la transferencia de vapor.

La mayor limitación de la teoría de Philip y De Vries radica en que las ecuaciones del modelo sólo se usan para la llamada «región capilar de la isoterma de sorción» (primer periodo de secado), debido a que es, en dicho periodo, donde se mantiene en el medio poroso una película de humedad continua, en el interior de los poros.

4.3.6 Teorías de Krischer y de Berger-Pei

Krischer [17] analizó la transferencia de calor y masa en una amplia variedad de medios porosos. Su trabajo ha servido como base para muchas de las teorías de secado. En su teoría básica, Krischer considera que durante el secado, la humedad puede migrar en el estado líquido por capilaridad y en el estado de vapor por un gradiente de concentración de vapor. Las ecuaciones que representan este modelo son:

- transferencia de calor

$$\alpha \nabla^2 T + \frac{L}{\rho_s c'} \left\{ K_v \left[(a-M) \nabla^2 \rho_v - \nabla M \rho_l \right] - (a-M) \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \rho_v \frac{\partial M}{\partial t} \right\} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

- transferencia de masa:

$$K_l \rho_l \nabla^2 M + K_v \left[(a-M) \nabla^2 M \rho_v - \nabla M \nabla \rho_v \right] = (\rho_l - \rho_v) \frac{\partial M}{\partial t} + (a-M) \frac{\partial \rho_v}{\partial t} \quad (10)$$

A su vez, Berger y Pei [18] señalaron que las principales dificultades encontradas en el modelo de Krischer son la aplicación de la isoterma de sorción y el uso de las condiciones de frontera del primer tipo.

Berger y Pei, a diferencia de Krischer, emplearon las ecuaciones acopladas de la transferencia de calor y masa, aunque cabe señalar que este modelo sólo ha sido aplicado a unos pocos casos.

4.3.7 Teoría de Kowalski-Strumillo

S. Kowalski y C. Strumillo [19] establecieron que un modelo integral de la transferencia simultánea de calor y masa, que considere todos los factores que intervienen en dicho proceso, implica serios problemas para resolverse analíticamente, y en uno de sus trabajos sugirieron que podría establecerse un modelo más simple, con base en la termodinámica de los procesos irreversibles, tomando en cuenta la transferencia de calor y masa, así como la presencia de esfuerzos [20].

La incorporación de las ecuaciones de esfuerzo-deformación, a las de transferencia de energía y masa para analizar el proceso de secado, constituye la parte novedosa de la teoría de Kowalski, ya que hasta antes de su aparición, en casi todos los modelos de secado se consideraba que el sólido no sufría deformaciones, lo que representa una simplificación para evitar llegar a un sistema de ecuaciones diferenciales prácticamente imposibles de resolver de forma analítica.

Las ecuaciones que representan al modelo de Kowalski son:

- transferencia de calor

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} + K_E \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} \right) - K_I \frac{\partial M}{\partial t} \quad (11)$$

- transferencia de masa

$$K_I \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = \frac{\partial M}{\partial t} + \gamma^s \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} \right) - \gamma^r \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (12)$$

- ecuación de esfuerzos-deformación:

$$(2R + A) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \gamma^r \frac{\partial T}{\partial x} + \gamma^s \frac{\partial M}{\partial x} \quad (13)$$

La solución de este sistema de ecuaciones permite conocer al mismo tiempo: contenido de humedad, temperatura, deformación y esfuerzo en los materiales durante su proceso de secado.

La teoría de Kowalski es relativamente reciente, y éste es el motivo por el que no se conoce mucho sobre la validez de los resultados que se pueden obtener con la misma en su aplicación a diferentes materiales.

4.3.8 Teoría de Whitaker

Whitaker [21] desarrolló su teoría del secado de medios porosos a partir de las ecuaciones de cada fase del proceso y

estableció una serie de ecuaciones de conservación para un volumen promedio del sólido. Esta modelación en general no difiere sustancialmente de la planteada por Luikov, pero debido a que tiene un buen sustento físico y matemático, ha tenido una buena aceptación en el área de secado, al grado de ser considerada como la mejor aproximación al estudio del secado en materiales porosos.

Las ecuaciones del modelo de Whitaker son:

- transferencia de calor

$$\begin{aligned} \overline{\rho c_p} \frac{\partial T}{\partial t} + \left\{ D_{pl} [\nabla p - D_{cs} \left(\frac{\rho_s^*}{\rho_l \varepsilon} \nabla M - \frac{1}{\rho_l \varepsilon} \nabla \rho_b^* - \frac{1}{\rho_l \varepsilon} \nabla \rho_v^* \right) \right. \\ \left. - D_{\sigma T} \nabla T - \rho_l g \right] c_{pl} - D_{pg} (\nabla p) c_{pg} \left. \right\} \cdot \nabla T = \\ = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) - L(\dot{m}_l + \dot{m}_b) - h_s \dot{m}_b + s \end{aligned} \quad (14)$$

- transferencia de masa

$$\begin{aligned} \rho_s^* \frac{\partial M}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ -D_{PM} \nabla p - D_{pl} \left[-D_{cs} \left(\frac{\rho_s^*}{\rho_l \varepsilon} \nabla M - \frac{1}{\rho_l \varepsilon} \nabla \rho_b^* - \frac{1}{\rho_l \varepsilon} \nabla \rho_v^* \right) \right. \right. \\ \left. \left. - D_{\sigma T} \nabla T - \rho_e g \right] - D_{bl} \nabla \rho_b^* - \rho_g D_{va} \nabla \left(\frac{\rho_v^*}{\rho_g} \right) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Hoy en día, la mayoría de los modelos de secado que están siendo estudiados, se originan en gran parte en los trabajos de Whitaker, con algunas modificaciones para tomar en cuenta la migración de la humedad y el efecto de sobrepresiones internas en el medio durante el secado.

Las ecuaciones de balance de masa, momento y energía de donde se origina este modelo, se plantean para analizar el proceso de migración de la humedad y la mezcla gaseosa a un nivel microscópico. Posteriormente se promedian sobre un volumen representativo para obtener las ecuaciones del fenómeno a nivel macroscópico. De esta forma, cualquier material poroso puede modelarse considerando a la fase sólida como un medio continuo.

El principal obstáculo en la aplicación de la teoría de Whitaker, es la dificultad para lograr una descripción apropiada del medio poroso real a nivel microscópico.

5. Conclusiones

A la fecha sigue siendo escaso el conocimiento que se tiene sobre los mecanismos que intervienen en el proceso de secado, empezando por la dificultad para describir de manera exacta la

estructura de los materiales. Más aún, incluir todos estos factores en un modelo general del proceso de secado sería muy complicado, y conduciría a sistemas de ecuaciones imposibles de resolver.

De las teorías analizadas, se pueden señalar a las de difusión líquida, capilar y de condensación- evaporación, como las más simples, dado que consideran que solo un mecanismo es el responsable de la migración de la humedad. Ninguna de estas teorías es adecuada para aplicarse al proceso de secado completo, dado que solo son válidas durante el periodo de secado de rapidez constante.

Las teorías de Philip-De Vries y Krischer-Berger-Pei fueron los primeros intentos por lograr un modelo general del proceso de secado, en donde se considera que la migración de la humedad se debe a más de un mecanismo. Estas teorías, con sus limitaciones, han servido para poder explicar el proceso de secado de un medio poroso durante el primer periodo de secado.

La teoría de Kowalski constituye una de las aproximaciones más interesantes conocidas hasta hoy, para estudiar los fenómenos de esfuerzo-deformación de un sólido durante el secado. Esta teoría deberá estudiarse más a fondo en los próximos años, con el objeto de lograr demostrar su validez o identificar sus limitaciones.

Luikov desarrolló una de las teorías de secado más completas conocidas hasta hoy. Sin embargo, a pesar de esto, no ha sido muy aceptada, dado que se le critica mucho la validez y el significado del potencial de transferencia de masa.

A la fecha, el modelo de Whitaker es el que se considera más completo y preciso para describir los fenómenos que ocurren durante el proceso de secado, a pesar de la imposibilidad de lograr una descripción exacta de un medio poroso real.

Cabe señalar que en tanto no se cuente con un modelo general del proceso de secado, no será posible dejar de usar alguna de las diferentes teorías existentes, dado que aún con sus limitaciones, en casos específicos han demostrado ser una buena herramienta para el estudio de este fenómeno.

El estudio de las diferentes teorías de secado de los medios porosos, es un paso para entender por qué uno de los procesos industriales más antiguos empleado por el hombre, sigue siendo hasta hoy en día tan poco comprendido.

Finalmente, el presente estudio es una primera etapa de un proyecto de investigación que se está llevando a cabo en el LABINTHAP de la SEPI-ESIME-IPN, con el objetivo de

comprender mejor los mecanismos involucrados durante el proceso de secado de los medios porosos, y como aprovechar este conocimiento en el mejoramiento de dichos procesos.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo de la CGPI-IPN por el financiamiento a los proyectos: CGPI No: 20021122, «Estudio teórico-experimental del secado de medios porosos» y CGPI No: 20040638, «Ahorro de Energía y Optimización de los Procesos de Secado por Convección de Medios Porosos». También a la UQROO y PROMEP por el apoyo para la realización de los estudios de doctorado en la ESIME-IPN.

Simbología

M	Contenido de humedad [$\text{kg}_{\text{hum}}/\text{kg}_{\text{sscco}}$]
t	Tiempo [s]
T	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$ ó K]
K_1	Coefficiente de difusión líquida [m^2/s]
J_1	Flujo de líquido [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$]
K_H	Permeabilidad [m^3/s]
K_v	Coefficiente de difusión de vapor [m^2/s]
M_v	Concentración de vapor en los poros [$\text{kg}_{\text{vap}}/\text{kg}_{\text{sscco}}$]
k	Coefficiente de conductividad térmica del sólido seco [$\text{W}/\text{m K}$]
k_{eff}	Conductividad térmica efectiva [$\text{W}/\text{m K}$]
L	Calor latente de evaporación [J/kg]
C_m	Capacidad isotérmica de humedad [$\text{kg}_{\text{hum}}/\text{kg}_{\text{sscco}} \text{ }^{\circ}\text{M}$]
c^*	Calor específico del cuerpo húmedo [$\text{J}/\text{kg K}$]
U	Potencial de humedad [adimensional]
D'	Coefficiente de difusión en función del potencial de humedad [m^2/s]
K_E	Coefficiente de deformación del material [adimensional]
A	Módulo de elasticidad [MPa]
R	Módulo de resistencia al corte [MPa]
p	Presión [N/m^2]
g	Aceleración de la gravedad [m/s^2]
D_{PM}	Coefficiente de transporte de humedad global [m^2/s]
D_{pl}	Coefficiente de transporte de líquido [m^2/s]
D_{bl}	Coefficiente efectivo de difusión de líquido ligado [m^2/s]
D_{va}	Coefficiente de difusión efectivo de vapor en aire [m^2/s]
D_{pg}	Coefficiente de transporte de gas [m^2/s]
m_l	Generación de líquido [$\text{kg}/\text{m}^3 \text{ s}$]
m_b	Generación de humedad ligada [$\text{kg}/\text{m}^3 \text{ s}$]
h_s	Calor de adsorción [J/kg]
s	Generación de energía [W/m^3]
C_{pg}	Calor específico de gas [$\text{J}/\text{kg K}$]
C_{pl}	Calor específico de líquido [$\text{J}/\text{kg K}$]
α^*	Coefficiente de difusividad térmica en función del potencial de humedad [m^2/s]

α	Contenido volumétrico de aire [adimensional]
ε	Tortuosidad [adimensional]
ε'	Coefficiente de transformación de líquido a vapor [adimensional]
δ	Coefficiente relativo de termodifusión en función del potencial de humedad [$^{\circ}\text{M}/\text{K}$]
α	Difusividad térmica
ρ_v	Densidad de vapor [kg/m^3]
ρ_l	Densidad de líquido [kg/m^3]
γ^s	Coefficiente de expansión volumétrica [adimensional]
γ^T	Coefficiente de expansión térmica [$1/\text{K}$]
ρ_b^*	Densidad real del agua ligada [kg/m^3]
ρ_v^*	Densidad real del vapor [kg/m^3]
Ψ	Potencial capilar [Pa]
ρ_s	Densidad del sólido [kg/m^3]
γ	Coefficiente de fracción de humedad en el medio poroso [adimensional]
ρ_s^*	Densidad real del sólido [kg/m^3]
ρ_g	Densidad del gas [kg/m^3]

6. Referencias

- [1] Franzen K, Liang H, Litchfield B, Murakami E. y Okos M, *Desing and Control of Energy Efficient Drying Processes with Specific Reference to Foods*. vol. 1 Literature Review DOE/ID/12608-2 ; 1987, pp. iii.
- [2] Strumillo C., Jones P, Romuald Z. Energy Aspects of Drying. In: Mujumdar AS, ed. *Handbook of Industrial Drying*, 2nd ed. New York, Marcel Dekker, 1995.
- [3] R. Hildebrand. *Kiln Drying of Sawm Timber*. Hildebrand Co. Germany. 1970.
- [4] R. B. Keey. Theoretical Foundations of Drying Technology. *Advances in Drying*, vol. 1. Hemisphere publishing Corp. 1980.
- [5] M. Fortes; M. R. Okos. Drying Theories: Their Bases and Limitations as Applied to Food and Grains. *Advances in Drying*, vol. 1. Hemisphere Publishig Corp. 1980.
- [6] W. K. Lewis, The Rate of Drying of Solid Materials. *J. Ind. Eng. Chem*, vol. 13, pp. 427-432, 1921.
- [7] J. van Brakel. Mass Transf. in Convective Drying. *Advances in Drying*, vol. 1. Hemisphere Publishig Corp. 1980.
- [8] S. Bruin; K. Ch. Luyben. Drying of Foods Materials: A Review of Recent Developments. *Advances in Drying*, vol. 1. Hemisphere publishing Corp. 1980.
- [9] J. Hernández; P. Quinto. *Aplicación del Modelo de Kowalski al Secado de Madera de Abeto*. VII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. México D. F. Noviembre 2003.
- [10] C. Cervantes Sandoval. *Análisis Teórico del Secado de Sólidos Porosos Mediante Simulación Numérica por Diferencias Finitas. Aplicación al Secado de Madera*. Tesis de maestría. SEPI-ESIME-IPN. 2000.

- [11] J. Hernández Rodríguez; P. Quinto Diez, Secado de Medios Porosos: Situación Actual y Perspectivas. VII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. México D. F. Noviembre 2003.
- [12] W. K. Lewis. The Rate of Drying of Solids Materials. J. Ind. Eng. Chem. Vol. 13, pp 427-432. 1921.
- [13] E. A. Buckingham. Studies on the Movement of Soil Moisture. US Dep.. Agr. Bull, 38, 1907.
- [14] P. S. H. Henry. Difusión in Absorbing Media. Proc. R. Soc. London. Vol. 171^a, pp 215-241, 1939.
- [15] A. V. Luikov. Application of Irreversible Thermodynamic Methods to Investigation of Heat and Mass Transfer, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 9, pp 139-152, 1966.
- [16] J. R. Philip, D. A. De Vries. Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients. Trans. Am. Geophys Union. Vol. 38, No. 2, pp. 222-232, 594, 1957.
- [17] O. Krischer. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Chap. IX, Springer Berlin, 1963.
- [18] D. Berger, D. C. T. Pei. Drying of hygroscopic capillary porous solids, a theoretical approach. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 16, pp 293-302, 1973.
- [19] Stefan Jan Kowalski; Czeslaw Strumillo. Moisture transport, thermodynamics, and boundary conditions in porous materials in presence of mechanical stresses. Chemical Engineering Science, Vol. 52, No 7, 1141-1150, 1997.
- [20] S. Kowalski. Thermomechanical Approach to shrinking and cracking phenomena in drying. Drying technology, Vol. 19, No. 5, pp. 731-765. 2001.
- [21] S. Whitaker; W. T-H. Chou. Drying Granular porous media (Theory and experiment). Drying Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 3-33. 1983.

ESIME Zacatenco

La Coordinación del Piso de Pruebas
para Transformadores de los
Laboratorios Pesados II de Ingeniería Eléctrica
cuenta con pruebas acreditadas
que se encuentran al servicio de la industria nacional.

PRUEBAS:

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

RESISTENCIA ÓHMICA

RIGIDEZ DIELECTRICA

TENSIÓN APLICADA

TENSIÓN INDUCIDA

ELEVACIÓN DE TEMPERATURA

IMPULSO

Tel. 5729 6000, ext. 54750
correo electrónico:
piso_pruebas@hotmail.com