

Título de la Tesis: “Deshidratación de productos frutihortícolas con vapor sobrecalentado”

Doctorado en Ingeniería Química

Autor: Elustondo, Diego Miguel

Director: Ing. Martín J. Urbicain

Resumen

Para definirlo en una frase, se puede decir que el secado con vapor sobrecalentado es una técnica en la cual se utiliza como agente de deshidratación el mismo agua que es evaporada de las sustancias que se están secando. En principio, para implementar este proceso simplemente se requiere introducir las muestras dentro de vapor de agua, calentado a una temperatura mayor que la temperatura en que ocurre la ebullición del líquido a la presión del sistema, pero como resultado se obtiene un tipo de secado que presenta numerosas ventajas frente a otras formas de secado convencional.

Una de las características más importantes es que el consumo de energía es aproximadamente el mínimo necesario para producir la evaporación. Esto se debe a que el vapor usado como medio calefactor y el vapor generado por evaporación se unen en una única corriente que es continuamente reciclada sobre las sustancias en deshidratación, y por ende, para mantener las condiciones del sistema en estado estacionario, solo se requiere suministrar al vapor sobrecalentado una cantidad de calor igual al cedido para la producir la evaporación, y extraerle una cantidad de vapor igual a la generada en dicha evaporación.

En comparación con el secado con aire, el secado con vapor sobrecalentado tiene otra interesante ventaja, que es que proporciona a los alimentos un medio ambiente donde el único gas presente es vapor de agua. Este hecho elimina el efecto negativo del oscurecimiento de las superficies externas de alimentos debido al pardeamiento enzimático, ya que esta es una reacción de oxidación y requiere la presencia de oxígeno gaseoso. Entonces, en alimentos tales como vegetales, donde el pardeamiento enzimático es un factor de degradación importante, el secado con vapor sobrecalentado suele mostrar un producto seco con muy buena conservación de color original, el que solo cambia

Título de la Tesis: “Deshidratación de productos frutihortícolas con vapor sobrecalentado”

Doctorado en Ingeniería Química

Autor: Elustondo, Diego Miguel

Director: Ing. Martín J. Urbicain

ligeramente por factores tales como la pérdida de humedad o el efecto de la temperatura.

Otra ventaja relacionada con el hecho de que todo el sistema se encuentra inmerso en vapor de agua, es que la presión de vaporización del líquido dentro de los alimentos es igual o mayor a la presión externa, o lo que es lo mismo, el agua evapora en condiciones de ebullición. Debido a esto, el vapor generado dentro del alimento se expande fácilmente y llena los espacios vacíos que antes se encontraban ocupados por el líquido, lo que compensa los esfuerzos de compresión y ayuda a mantener la forma original del alimento. Esta propiedad del secado con vapor sobrecalentado permite obtener alimentos secos con estructuras altamente porosas y en algunos casos similares a las obtenidas por la técnica de liofilización.

La obtención de estructuras porosas también se ve favorecida por el hecho de que no existe ningún gas inerte que obstruya el paso del vapor generado a través de los poros, favoreciendo una rápida deshidratación de la superficie externa de los alimentos y la posterior formación de una capa de material seco que crece hacia el interior de la sustancia. Al mismo tiempo, la aparición de un frente de evaporación que avanza hacia el interior del alimento evita que el líquido tenga que difundir hacia la zona de evaporación, reduciendo así el encogimiento de la zona húmeda y la migración de sólidos de un lugar a otro.

Si bien este tipo de secado ya ha sido aplicado ventajosamente a ciertos procesos tales como el secado de madera y carbón, lo que hace original a este trabajo es que se aplicó a productos frutihortícolas y en condiciones de presión subatmosférica. Esto se hizo porque el uso de baja presión permite reducir la temperatura de ebullición del líquido a valores moderados del orden de 40 ~ 60 °C, limitando así el negativo efecto que tiene la temperatura en el procesamiento de alimentos en general termosensibles.

Título de la Tesis: “Deshidratación de productos frutihortícolas con vapor sobrecalentado”

Doctorado en Ingeniería Química

Autor: Elustondo, Diego Miguel

Director: Ing. Martín J. Urbicain

Por otro lado, el uso de baja presión introduce la que es tal vez la única desventaja importante de esta técnica, ya que implica la construcción de un secadero hermético y generalmente del tipo batch, pero en algunos casos esta característica puede convertirse en una propiedad útil. Una de las aplicaciones que resulta del hecho de usar un secadero hermético, es que los volátiles perdidos por los alimentos quedan atrapados y recirculando dentro del equipo y pueden ser extraídos para su posterior recuperación. El efecto de la descompresión al que se expone el alimento cuando se reduce la presión también puede ser utilizado como herramienta del proceso, ya que si se disminuye la presión del vapor sobrecalentado hasta un punto tal en que la temperatura de ebullición del líquido queda por debajo de la temperatura real del alimento, se induce una rápida generación interna de vapor que puede ser utilizada para obtener productos más inflados o del tipo puff.

Por último, y ya en referencia a este trabajo, se puede decir que el secado de alimentos con vapor sobrecalentado a baja presión es una técnica original, con numerosas ventajas y aplicaciones, pero para la cual hay muy poca información disponible. Por tal motivo este estudio está orientado al desarrollo global de aspectos tales como la construcción del equipo, la caracterización de los productos secos, el estudio de la cinética de secado, la simulación, etc, pero no se limita a estudiar rigurosa y exhaustivamente un alimento o un equipo en particular, sino que se busca generalizar los resultados analizando una gran cantidad de mediciones simples y desarrollando ecuaciones de aplicación general. Los principales temas analizados son los siguientes:

Como al momento de comenzar este estudio existían muy pocas aplicaciones de esta técnica en el campo de los alimentos, la primer parte del trabajo está dedicada al diseño y construcción de un equipo experimental. Con este primer equipo ya en funcionamiento se determinaron los aspectos funcionales tales como la velocidad de recirculación del vapor sobrecalentado y los coeficientes de transferencia de calor. Más adelante se comenzó el estudio sistemático de la deshidratación de alimentos. En este punto, el relativamente

Título de la Tesis: “Deshidratación de productos frutihortícolas con vapor sobrecalentado”

Doctorado en Ingeniería Química

Autor: Elustondo, Diego Miguel

Director: Ing. Martín J. Urbicain

reducido tamaño del secadero se convirtió en un factor limitante para el desarrollo de las investigaciones, y por lo tanto se construyó un segundo equipo más eficiente y con mucha mayor capacidad de secado. Finalmente, y en base a la experiencia ganada, se propuso el esquema de un secadero industrial que ya fue patentado. (Capítulo 1)

En base a las experiencias realizadas se pudo observar que el secado con vapor sobrecalentado entrega un producto seco que en general conserva muy bien la forma original. Sin embargo, la deformación del alimento durante el secado está relacionada en gran medida con las características de su tejido celular y las fuerzas de cohesión con el líquido que contienen. Entonces, para poder intuir qué tipo de respuesta tendrá un alimento al ser deshidratado, se realiza una clasificación en función a los diferentes tipos de tejidos celulares que conforman un vegetal y a los fenómenos que hacen que el agua sea retenida en el interior de la matriz sólida. (Capítulo 2)

Otra de las características observadas es que con esta técnica de secado se reduce significativamente el pardeamiento de las superficies externas de los alimentos. Para demostrar esto experimentalmente se seca una gran cantidad de alimentos y se compara su color antes y después del secado. Desde el punto de vista cuantitativo la comparación del color no resulta trivial ya que los colorímetros comerciales no son apropiados para medir las superficies de alimentos con formas irregulares, superficies rugosas, y coloración poco homogénea. Por tal motivo, se hace una pequeña descripción del concepto de escalas de color, y en base a esto se propone un método de medición aproximado basado en la digitalización de imágenes. (Capítulo 3)

Un aspecto complementario a la deshidratación, aunque totalmente diferente, es la rehidratación, que depende de muchos factores tales como el tipo de alimento, la forma, la temperatura del líquido, la solución empleada, etc. En nuestro caso no se estudia el tema en profundidad ya que este no es el objetivo del trabajo, pero para tener una idea aproximada

Título de la Tesis: “Deshidratación de productos frutihortícolas con vapor sobrecalentado”

Doctorado en Ingeniería Química

Autor: Elustondo, Diego Miguel

Director: Ing. Martín J. Urbicain

de los tiempos y porcentajes de recuperación, se hacen mediciones experimentales de rehidratación en varios alimentos y se analizan los aspectos generales del proceso. Para la obtención de los datos experimentales se desarrolla un simple dispositivo que permite medir simultáneamente la variación de peso de la sustancia y su volumen total. (Capítulo 4)

Una vez realizada una descripción general de las características del producto deshidratado, el siguiente objetivo es el estudio de la cinética de secado. Desde el punto de vista experimental se pudo observar que el proceso interno del secado de alimentos sigue en general un mismo patrón, en el que se forma una capa externa de material seco que avanza hacia el interior de la sustancia todavía húmeda. En base a estas observaciones se desarrolla el modelo de la capa seca, que si bien ya ha sido utilizado por muchos otros autores, aquí se generaliza para cualquier geometría en que se pueda asumir que el espesor de la capa seca crece en forma más o menos uniforme. (Capítulo 5)

Para comparar este modelo con las observaciones de otros autores se presenta un resumen de bibliografía encontrada en relación a la cinética de secado con vapor sobrecalentado. Los trabajos fueron seleccionados de modo de hacer mención a los aspectos más importantes, tales como los diferentes períodos en que se puede dividir el tiempo total de secado, la forma en que se distribuye la zona húmeda y seca dentro del alimento, el comportamiento de las variables durante el proceso, y las ecuaciones de transferencia de calor y masa. (Capítulo 6)

La bibliografía recopilada confirma el modelo de la capa seca, pero también indica que la velocidad de secado depende de la difusión de agua desde el interior del alimento. Es decir, si bien la velocidad de secado puede ser calculada conociendo el espesor de la capa seca, este espesor depende no solo de la cantidad de agua evaporada sino que también de la velocidad de difusión del líquido desde la zona húmeda. Entonces, para terminar de describir completamente la cinética de secado, se asume un mecanismo para la difusión del

Título de la Tesis: “Deshidratación de productos frutihortícolas con vapor sobrecalentado”

Doctorado en Ingeniería Química

Autor: Elustondo, Diego Miguel

Director: Ing. Martín J. Urbicain

líquido y se deduce un modelo teórico de cinética de secado que combina los dos efectos. Por otro lado, debido a la geometría irregular de los alimentos y a la dificultad de predecir el valor de sus constantes termofísicas, el modelo teórico es muy difícil de aplicar en la práctica y por lo tanto también se proponen algunas ecuaciones empíricas para el ajuste de los datos experimentales. (Capítulo 7)

Una vez estudiados los procesos internos que acompañan a la deshidratación de alimentos, el siguiente paso es el estudio del secado pero desde el punto de vista del equipo. Las variables operativas que definen las condiciones del secado son la temperatura, la presión y la velocidad de recirculación del vapor sobrecalentado, pero mientras que la presión y la velocidad de recirculación no se alteran por el secado, la temperatura del vapor sobrecalentado disminuye al ir pasando sobre la sustancia en deshidratación. Para cuantificar este efecto se propone un número adimensional que relaciona la capacidad de transferir calor y la capacidad de transportar calor que tiene del vapor sobrecalentado, y en base a este número se describe la velocidad de secado en un secadero con vapor sobrecalentado. Por otro lado, el valor que pueden tomar las variables operativas depende de las características del equipo y de los límites de temperatura admisibles, pero dentro de estos rangos demostramos matemáticamente que una vez que están definidas la temperatura y la velocidad de recirculación del vapor sobrecalentado, existe un valor óptimo de presión en la cuál la velocidad de secado alcanza su máximo valor. Este resultado sirve para determinar las condiciones operativas óptimas del secadero, y en particular se demuestra que independientemente de cuál sea el secadero, existe una presión máxima por sobre la cual siempre se está trabajando en forma ineficiente. (Capítulo 8)

Finalmente se realiza la simulación de un secadero imaginario en donde la sustancia húmeda se coloca sobre planos horizontales ubicados uno encima de otro. Antes de la simulación se calcula la velocidad total de secado en el instante inicial, la que es independiente de la sustancia y sirve para elegir las condiciones operativas del proceso, y

Título de la Tesis: “Deshidratación de productos frutihortícolas con vapor sobrecalentado”

Doctorado en Ingeniería Química

Autor: Elustondo, Diego Miguel

Director: Ing. Martín J. Urbicain

luego, se aplican las ecuaciones deducidas en este trabajo para simular el proceso de secado en el caso de manzana verde. Para esto se realiza un cálculo iterativo sobre pequeñas porciones del área total de transferencia de calor, y el resultado numérico se presenta en gráficos que muestran el contenido de humedad en función al tiempo y la posición dentro del secadero.(Capítulo 9)

Título de la Tesis: “Deshidratación de productos frutihortícolas con vapor sobrecalentado”

Doctorado en Ingeniería Química

Autor: Elustondo, Diego Miguel

Director: Ing. Martín J. Urbicain

Abstract

Superheated steam drying consists of exposing the wet foodstuff to a superheated water vapor, which results in an advantageous drying technique as compared with other conventional drying methods. For example, some of its advantages are:

- Energy consumption is approximately the minimum needed to produce the evaporation. Both the superheated steam and the evaporated water can be recycled continuously inside the drier. Therefore, to maintain a stationary state, it is only required to supply an amount of heat equal to the heat used for evaporation, and to extract an amount of steam equal to the vapor produced.
- Another interesting advantage related to the vapor background is that the drying progress occurs in absence of oxygen. This characteristic minimizes all possible oxidative deterioration, and specially the enzymatic browning, an oxidative reaction that produces unpleasant change of color in many foods.
- The water equilibrium pressure is equal or higher than the superheated steam pressure; the vapor produced inside the food can expand into the coils, helping to produce a highly porous structure and to maintain the original shape.
- Because there is no gas other than steam that can obstruct the exit of the vapor produced inside the sample, the drying rate can be faster. It is usually observed that a dry layer forms separating the external surface and the inner wet zone. This dry layer implies that water evaporates in its original place without diffusion within the product, and this diminishes food shrinkage and migration of soluble substances.

To reduce the negative effect that temperature has on heat-sensitive foods, subatmospheric pressures were used, (10000 ~ 20000 Pas), because this lowers water boiling temperature to moderate values, in the order of 40 ~ 60 °C. The need for subatmospheric pressures requires an hermetic batch drier, but sometimes this disadvantage can be an advantage. For example:

- The hermetic drier implies that volatile substances from the drying material remain trapped and recycled inside the equipment, so that they can be extracted for a later recuperation. Also, this minimizes the loss of aroma from the product.

Título de la Tesis: “Deshidratación de productos frutihortícolas con vapor sobrecalentado”

Doctorado en Ingeniería Química

Autor: Elustondo, Diego Miguel

Director: Ing. Martín J. Urbicain

- Decompression inside the drier can also be used to change the product quality. If superheated steam pressure is reduced below the pressure in which water at food temperature evaporates, water inside food starts to boil vigorously and the samples become puffed.

In summary, drying with superheated steam is a technique with numerous advantages but there are still few applications in the food technology. This thesis is orientated to study the whole process, and includes analysis of many potential applications.

- First, a laboratory drier was constructed for systematic dehydration various foodstuffs. The relatively small size of this drier became a limiting factor, so a second larger and more efficient one was designed and constructed, and used to obtain most of the experimental reported data. Finally, based on the previous experience, a scheme of a third industrial drier was proposed and patented.
- In practice, drying with superheated steam tends to conserve the original shape, but there could also be some shrinkage that depends strongly on the food characteristics. To predict it, an empirical classification of food shrinkage was made as a function of the different cellular tissues and physical absorption phenomena.
- The absence of enzymatic browning during drying was proved experimentally by measuring food color change. In practice, quantitative measures of color are not easy because of food irregular shapes, rough surfaces, and no homogeneous coloration. Therefore, an approximate method of color measurement was developed based on the image digitization.
- In practice, it can be observed that drying usually proceeds in the same pattern, the formation of a dry layer that starts at the external food surface and grows towards the inner wet zone. Based on this behavior a dry layer model was developed and generalized for all shapes.
- In order to compare the theoretical model with other authors' experimental observations, a bibliographical review was made. Papers were selected to mention important aspects like the different periods in which the total drying time is subdivided, the formation of the dry and wet zones, the heat and mass transfer equations, and so on.
- Bibliography also suggests the existence of water diffusion from the wet zone to the dry layer. Then, we proposed an empirical mechanism for water diffusion that combined with the

Título de la Tesis: “Deshidratación de productos frutihortícolas con vapor sobrecalentado”

Doctorado en Ingeniería Química

Autor: Elustondo, Diego Miguel

Director: Ing. Martín J. Urbicain

dry layer model permits to obtain a general theoretical model for the drying kinetic. On the other hand, irregular food geometry and hardness to predict thermophysical properties make the model difficult to apply, simplified equations were derived which are useful to fit the experimental data as well.

- With respect to the drier equipment, a new dimensionless number is defined that compares for superheated steam the capacity to transfer heat and the capacity to transport heat. Then, an equation was deduced to describe the drying rate as function of the drier variables. Finally, it was demonstrated that once temperature and recycling velocity are chosen, there exists an optimum pressure at which drying rate becomes maximum, and particularly, a maximum optimum pressure was found over which all dryers are inefficient.
- Finally, a numerical simulation was made for green apple slices dried in an industrial flat-sheet drier. Total initial drying rate was calculated to select the operative conditions, and then, simulation was made over small portions of the total food external area. The numerical result is shown in the form of graphs of moisture content as functions of time and position inside the drier.