

Secado de trigo por inmersión en un lecho particulado agitado de arcilla pilarizada de aluminio (Al-PILC)

Guillermo Osorio,¹ Guillermo Solano,¹ Socorro López,² Sofía Arellano² y Tzayhrí Gallardo^{2*}

¹ Departamento de Ingeniería Bioquímica. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional. Plan de Ayala y Carpio s/n, Col. Sto. Tomás. México 11340, D.F. e-mail: tgallard@encb.ipn.mx.

² Departamento de Biofísica. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional.

Recibido el 13 de septiembre del 2003; aceptado el 9 de junio del 2004

Resumen. Se secó trigo variedad *Triticum durum* por inmersión en lecho particulado agitado, utilizando arcilla natural, arcilla pilarizada de aluminio (Al-PILC), zeolita 13X y arena, a diferentes temperaturas iniciales del medio particulado y tiempos de contacto. Los resultados mostraron que la zeolita generó la mayor pérdida de humedad de grano respecto al tiempo, seguida por la Al-PILC, arcilla natural y finalmente la arena, siendo la capacidad de secado de la Al-PILC cercana a la de la zeolita. La Al-PILC transfirió del 85-94% del calor y evaporó del 83-93% de la humedad con respecto a aquellas obtenidas con zeolita. Los resultados también mostraron que la zeolita y la Al-PILC presentaron las mejores características de transferencia de calor y masa, por lo que la Al-PILC puede ser utilizada como alternativa a la zeolita en el secado de granos.

Palabras clave: Secado por inmersión, lecho particulado, arcilla pilarizada, PILC, arena.

Abstract. Wheat (*Triticum durum*) was dried by immersion in a particulate medium grain drier, using a natural clay, a pillared aluminium clay (Al-PILC), zeolite 13X and sand, as particulate medium at different initial bed temperatures and residence time of the grain within the dryer. Results showed that zeolite caused the highest grain moisture loss with drying time, followed by Al-PILC, then the natural clay and finally the sand. The drying capacity of the Al-PILC was similar to that of the zeolite. The Al-PILC transferred 85-94% of the heat and evaporated 83-93% of moisture grain compared to that obtained by zeolite. Results also showed that the zeolite and the Al-PILC had the best heat and mass transfer properties of the four particulated materials used, and that the Al-PILC can be used as an alternative of the zeolite in immersion particulate medium grain drying.

Keywords: Immersion drying, particulated bed, pillared clay, PILC, sand.

Introducción

Debido a las grandes pérdidas que se tienen durante el almacenamiento de granos por respiración y evaporación, así como también por la acción de insectos, roedores, hongos y bacterias, es de primordial importancia el mantener el grano a una baja humedad (15% o menos) [1] para su almacenamiento. El método convencional de secado de granos y semillas ha sido por medio del uso de aire caliente. Sin embargo, para incrementar la velocidad de secado, se ha propuesto el uso de secado por inmersión en un lecho particulado agitado [2]. El uso de sal [3], esferas de acero [4] y de forma generalizada arena [5-7], han sido reportados como sólidos particulados en el secado por inmersión.

Mientras que la arena tiene propiedades adecuadas para la transferencias de calor, adolece de las propiedades deseables de transferencia de masa, dando como resultado una baja eliminación de humedad. Con el fin de subsanar el problema anterior, se han realizado estudios del secado del maíz por inmersión, utilizando zeolitas como medio particulado, obteniendo mejores resultados que con la arena [8,9].

En la literatura especializada se ha publicado el desarrollo de un nuevo tipo de material adsorbente con una superficie específica de 200-500 m²/g, y con potencialidad para ser utilizado como material particulado para secado, al cual se le conoce como "Arcilla Pilarizada o PILC" [10-13].

La Arcilla Pilarizada es una arcilla tipo esmectita, la cual ha sido modificada por medio de la intercalación de polímeros inorgánicos en el espacio interlamilar, los cuales forman, después de un proceso de deshidratación, una galería de "pilares" entre las laminillas estructurales de la arcilla. Como resultado, se obtiene un material arcilloso poroso con una superficie específica de 200-500 m²/g, considerablemente mayor que el de la arcilla original [10]. Estas características se han aprovechado para su uso como catalizadores en la industria petrolera, pero es obvio pensar que pueden ser utilizados como adsorbentes en otras áreas.

López [12], estudió la capacidad de adsorción de vapor de agua de arcillas pilareadas de aluminio, obteniendo que estos materiales presentan buena capacidad de adsorción. Estos resultados sugieren la posibilidad de que las arcillas pilarizadas puedan ser utilizadas como una alternativa a los medios particulados usados en el secado de granos.

Hasta la fecha, no se han encontrado referencias en la literatura del uso de arcillas o arcillas pilareadas en el secado por inmersión de granos y semillas, por lo que en el presente trabajo se estudió el uso potencial de estos materiales para el secado trigo de la variedad *Triticum durum* en medio particulado agitado. Como parámetro de comparación, el trigo también se secó utilizando zeolita y arena, los cuales han sido utilizados como lechos particulados en investigaciones previas [6-9].

Materiales y métodos

El secador utilizado fue diseñado y construido en el laboratorio del tipo mezclador de polvos aislado térmicamente y recubierto en su superficie interna con una placa de teflón de 3 mm. Este secador puede trabajar a diferentes velocidades de rotación y está dotado de una puerta con pasador de apertura rápida para la descarga de los sólidos al final de la corrida de secado. Un esquema del secador se presenta en la figura 1.

Los lechos particulados utilizados en este trabajo fueron: una arcilla pilarizada de aluminio (Al-PILC), la cual fue preparada de acuerdo al procedimiento publicado por Arellano [11]; una arcilla natural mexicana (bentonita); arena, ambas suministradas por Inertes y Filtrantes S. A. de la Ciudad de México y zeolita tipo 13X de Union Carbide con el nombre comercial Molosiv Adsorbent 13X. Los cuatro medios particulados fueron tamizados en una malla del número 65 para homogeneizar el tamaño de partícula. Estos medios se introdujeron a un horno a la temperatura seleccionada (100, 150 y 200°C) por un tiempo mínimo de 24 h antes de su uso en el secador por inmersión. La temperatura máxima utilizada fue de 200°C de manera de evitar daños térmicos irreversibles al trigo durante el proceso de secado.

El grano utilizado (*Triticum durum*) se acondicionó a una humedad de 24 % base seca ($0.24 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$), lo cual se logró agregando la cantidad de agua requerida y mezclando por un tiempo de 48 h en un mezclador de tambor rotatorio. Transcurrido este tiempo se determinó la humedad del grano y se introdujo al secador. En todas las corridas de secado se utilizó una carga de trigo de 100 g con una relación en masa, medio particulado:trigo de 6:1. La velocidad de rotación de la cámara de secado fue de 25 rpm para todas las corridas, operando por un tiempo de contacto de 3, 6 y 10 min para las temperaturas iniciales del medio de 100 y 150 °C, y de 1, 3 y 6 min para la temperatura inicial del medio de 200°C.

Al final de cada corrida de secado, el trigo fue separado del medio particulado utilizando una criba inclinada. Al trigo se le determinó humedad, temperatura superficial y tempera-

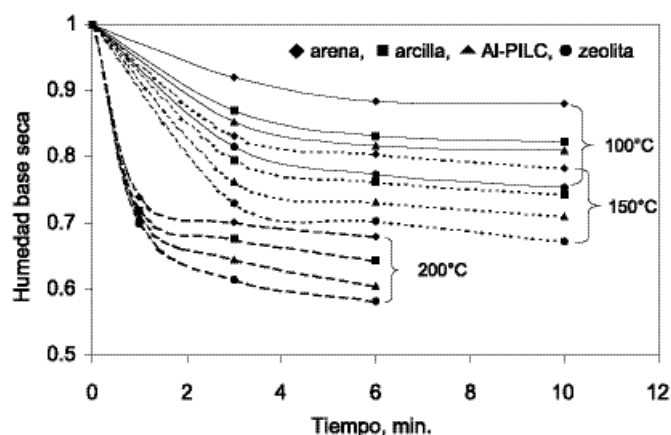


Fig. 2. Curvas de secado normalizadas para trigo (*Triticum durum*) obtenidas con los diferentes materiales particulados y temperaturas iniciales del medio: — 100°C; - - - 150°C; ····· 200°C.

tura promedio. Al medio particulado únicamente se le determinó temperatura promedio final.

El método utilizado para la determinación de la humedad del trigo fue el recomendado por la AOAC [14]. La temperatura de los medios particulados se obtuvo por inmersión de un termopar tipo K acoplado a un termómetro digital DigiSense K, Cole Palmer.

La temperatura superficial del trigo al final de cada corrida de secado fue determinado con un termómetro infrarojo Cole Palmer 1-800-323-4340, mientras que para la determinación de la temperatura promedio del grano fue necesario fabricar un recipiente de 200 mL con tapa de espuma de poliestireno. A éste se le introdujo un termopar tipo K por su parte inferior conectado a un sistema de captura de datos (Datalogger Digital Extech 383274), el cual se programó para que registrara lecturas de temperatura cada 1.5 s por un lapso de 3 min.

Al final de cada corrida, una muestra del trigo se introdujo de inmediato en el recipiente de espuma, iniciando la captura de datos. La temperatura máxima registrada por éste, fue considerada como la temperatura promedio del trigo.

Resultados y discusión

Efecto de la temperatura inicial del medio particulado y del tiempo de residencia sobre el grado de deshidratación del trigo. La figura 2 presenta las curvas de secado obtenidas para cada uno de los materiales y temperaturas de proceso. Dado que la humedad inicial del trigo no fue exactamente la misma para todos los casos, estas curvas se presentan con la humedad base seca ($\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$) normalizada lo que permite una comparación directa entre las capacidad de secado de cada uno de los medios particulados. Como se puede observar en esta figura, para cualquiera de las temperaturas de proceso, la capacidad que presentan los materiales adsorbentes de secar al grano disminuye en la secuencia: zeolita 13X >

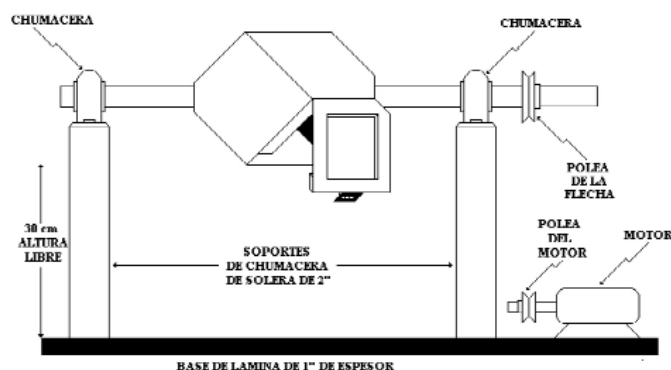


Fig. 1. Diagrama esquemático del secador-meclador utilizado en las corridas de secado por inmersión en lecho particulado.

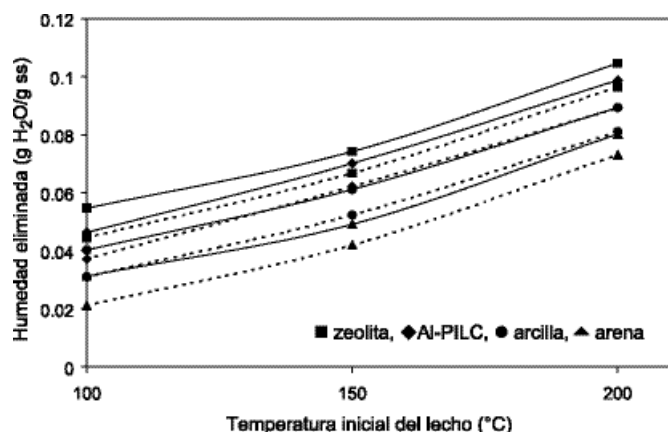


Fig. 3. Efecto de la temperatura inicial del medio particulado sobre la cantidad de humedad eliminada del trigo, respecto al medio utilizado y tiempo de residencia: — 6 min; - - - 3 min.

Al-PILC > arcilla > arena, siendo la arena el material que más se ha utilizado en este tipo de secado de granos. La figura 2 también muestra que la capacidad de secado que presentan la zeolita y la Al-PILC no son muy diferentes y que esta diferencia disminuye conforme aumenta la temperatura inicial del medio particulado, siendo ambas notoriamente superiores a la de la arena. A los tres minutos de secado, la Al-PILC alcanza el 83%, 93% y 93% del secado logrado por la zeolita para las temperaturas iniciales del medio de 100°, 150° y 200°C respectivamente.

A los 6 min de secado, la Al-PILC alcanza el 85%, 95% y 95% del secado logrado por la zeolita para las mismas temperaturas, respectivamente. Esta figura también muestra que la mayor velocidad de eliminación de humedad para cualquiera de los materiales utilizados y temperaturas iniciales del lecho se presenta en los tres primeros minutos de secado.

Con respecto al efecto de la temperatura de proceso, la figura 3 muestra que el incremento de la temperatura inicial del lecho particulado de 100 a 150 °C provoca un aumento promedio en la cantidad de agua removida del grano, equivalente a 1.8 y 1.4 veces la correspondiente a 100 °C, para los tiempos de residencia de 3 y 6 min respectivamente. Para la temperatura inicial del lecho particulado de 200 °C, el aumento promedio en la cantidad de agua removida del grano fue de 2.5 y 2.3 veces mayor que aquella a 100 °C para los mismos tiempos de residencia respectivamente.

Efecto de la temperatura inicial del medio particulado y del tiempo de residencia sobre la temperatura final del trigo. La temperatura alcanzada por el trigo respecto al tiempo de contacto con el medio particulado al final del secado, para cada una de las temperaturas iniciales de éste, se presenta en la figura 4. En esta figura se observa que para cualquiera de las temperaturas iniciales y medios de secado, la temperatura del trigo disminuye conforme transcurre el tiempo de contacto, lo cual es debido a la evaporación de la humedad del trigo. Esta figura también muestra que la temperatura alcanzada por

el trigo secado con zeolita, es el que alcanza la mayor temperatura final, seguida por la Al-PILC, la arcilla y finalmente la arena, independientemente de la temperatura inicial del medio. Estos resultados indican que aparentemente la zeolita está transfiriendo más calor al trigo que la Al-PILC, ésta más que la arcilla y ésta última más que la arena. Si el secado del trigo se realiza exclusivamente por transferencia de calor, dada la similitud en las capacidades caloríficas de estos materiales (0.836 kJ/kg K para la zeolita [15]; 0.886 kJ/kg K para la Al-PILC (determinación experimental), 0.880 kJ/kg K para la arcilla y 0.800 kJ/kg K para la arena [16] y ya que se utilizó la misma masa de todos los medios particulados en cada corrida de secado, se esperaría una mayor caída de temperatura en la zeolita, seguida por la Al-PILC, la arcilla y finalmente la arena. Como la temperatura inicial de cada medio particulado fue la misma (100, 150 y 200 °C), la temperatura final de la zeolita que transfirió más calor debería ser la menor de todos los materiales seguida por Al-PILC, la arcilla y finalmente por la arena en forma ascendente. Sin embargo, los resultados experimentales mostraron un efecto completamente opuesto como se puede observar para la temperatura inicial de 200 °C en la figura 5, en la cual se puede apreciar que la zeolita fue el material que alcanzó la máxima temperatura final para cualquier tiempo de contacto, seguida de la Al-PILC, la arcilla y finalmente la arena, que según la discusión anterior debería haber alcanzado la temperatura mayor pues fue la que aparentemente transmitió menos calor al trigo.

El comportamiento de los medios particulados mostrado en la figura 5, sólo puede explicarse tomando en cuenta las propiedades de transferencia de masa que poseen cada una de los medios (capacidad de adsorción) y no solo por la transferencia de calor de éstos al trigo. Como la zeolita es el material que posee la mayor capacidad de adsorción de vapor de agua de los otros tres [12,17], al ceder calor al trigo para evaporar la humedad, ésta se enfría incrementando su capacidad de adsorción. La humedad evaporada es entonces adsorbida por la zeolita, liberando en ésta la energía en exceso de la entalpía

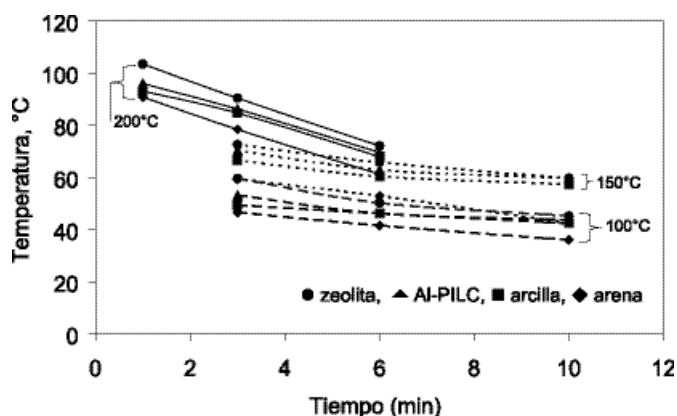


Fig. 4. Temperatura alcanzada por el trigo al final del proceso de secado para los diferentes tiempos de residencia y temperaturas iniciales del medio de secado: — 200 °C; - - - 150 °C; 100 °C.

de adsorción, siendo en parte absorbida nuevamente por la zeolita, lo que provoca en suma que la temperatura de la zeolita disminuya menos de lo que debería si se considerara únicamente el calor transferido. Para la PILC, que posee una capacidad de adsorción de vapor de agua menor que el de la zeolita, pero mayor al de la arcilla y arena [18], sucede lo mismo, pero como se adsorbe menos vapor de agua, la entalpía liberada en el seno de la Al-PILC es menor, lo que da como consecuencia que la temperatura de la Al-PILC disminuya más rápido que la de la zeolita, pero más lento que la de los otros dos materiales. Lo mismo sucede con la arcilla que tiene una capacidad de adsorción de vapor de agua menor que la Al-PILC; y finalmente para la arena, al no tener capacidad de adsorción alguna, no recupera nada del calor cedido al trigo, el cual abandona el lecho con el vapor desprendido de este último, lo que da como consecuencia que se enfríe más rápido que cualquiera de los otros materiales, aún después de haber transferido, aparentemente la menor cantidad de calor al trigo.

Calor transferido al trigo durante el proceso de secado. De manera de conocer la cantidad de calor cedido al trigo por cada uno de los materiales utilizados, se determinó éste a partir de las condiciones iniciales y finales del trigo para diferentes tiempos de contacto.

Con el fin de determinar el gradiente de temperatura interna en el grano, se compararon las temperaturas superficial y promedio del grano, encontrando que las diferencias entre éstas fue del orden de 2-3 °C independientemente del tiempo y de la temperatura inicial del medio. Dada esta pequeña diferencia, se decidió utilizar la temperatura externa para los cálculos del calor transferido al trigo durante la operación de secado, ya que la transferencia es del medio a la superficie del trigo.

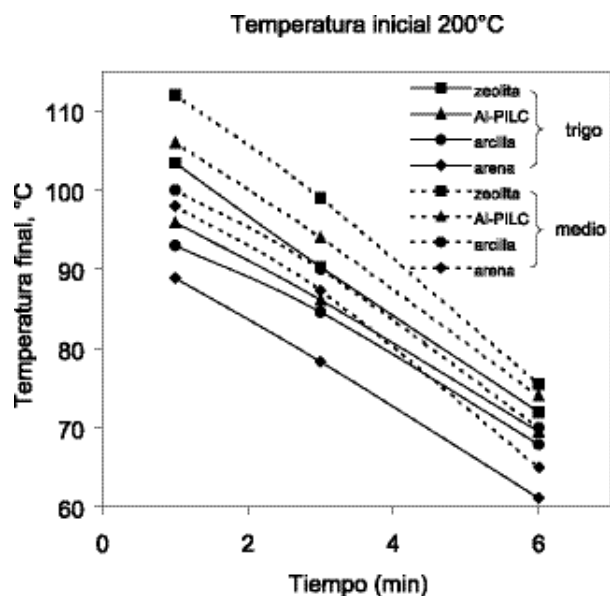


Fig. 5. Comparación de la temperatura alcanzada por el trigo (—) y el medio particulado (-----) al final del proceso de secado para diferentes tiempos de residencia y una temperatura inicial de 200 °C.

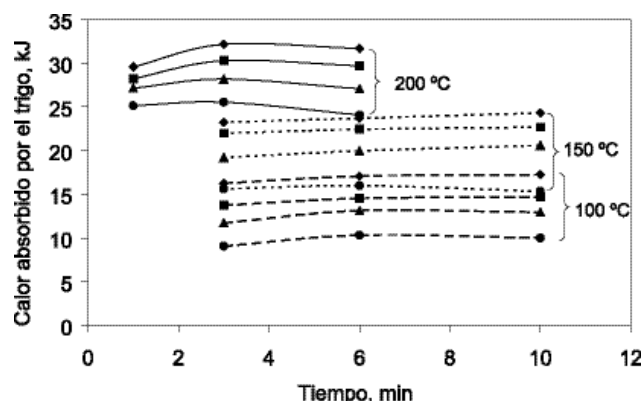


Fig. 6. Calor absorbido por el trigo durante el proceso de secado con los diferentes medios particulados, tiempos de residencia y temperatura inicial del medio; ——— 200 °C; ----- 150 °C; 100 °C.

El cálculo del calor absorbido por el trigo a los distintos tiempos de residencia y temperaturas de operación para cada uno de los medios particulados fue realizado por la determinación de las entalpías iniciales y finales del grano, así como la entalpía del vapor de agua eliminada durante el proceso, despreciando otros calores como el calor de mojado y calor de adsorción del agua en el trigo.

El cálculo del calor transferido al trigo, se realizó con las siguientes ecuaciones:

$$Q_{\text{trigo}} = L_s(h_2 - h_1) + L_s \Delta X H_v$$

$$h_1 = C_{p_{\text{trigo}}} (t_1 - t_0) + X_i C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} (t_1 - t_0)$$

$$h_2 = C_{p_{\text{trigo}}} (t_2 - t_0) + X_i C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} (t_2 - t_0)$$

Donde:

Q_{trigo} : Calor absorbido por el trigo, kJ.

h_1 y h_2 : Entalpías al inicio y final de las corridas de secado, J/kg.

H_v : Entalpía del vapor de agua eliminada, kJ/kg.

L_s : Masa inerte del trigo, kg sólido seco.

X_i y X_f : Humedad inicial y final base seca del trigo, kg agua / kg sólido seco.

Δx : Pérdida de humedad en el grano, kg agua / kg sólido seco.

$C_{p_{\text{trigo}}}$: Capacidad calorífica del trigo [19], 1.255 kJ / kg °C.

$C_{p_{\text{H}_2\text{O}}}$: Capacidad calorífica del agua, 4.184 kJ / kg °C.

t_0 : Temperatura de referencia, 0 °C.

t_1 y t_2 : Temperaturas inicial y final del trigo durante el proceso, °C.

Los resultados obtenidos para los distintos tiempos de contacto y temperaturas utilizadas se muestran en la figura 6. Esta figura indica que para cualquier tiempo de contacto y temperatura inicial del medio, la zeolita fue el medio que logró transferir mayor cantidad de calor al trigo, seguida por la arcilla pilarizada (Al-PILC), la arcilla natural y en última ins-

tancia la arena, orden que se observa a lo largo de los experimentos realizados. Para todas las temperaturas, se observa un marcado distanciamiento entre la arena y los demás medios en cuanto a la capacidad de calor absorbido por el trigo, comportamiento que concuerda con su baja tasa de eliminación de humedad en comparación con los otros materiales granulados. Con respecto a la zeolita y la Al-PILC, la figura 6 muestra que esta última transfiere en promedio el 85% del calor transferido al trigo por la zeolita para una temperatura inicial del medio de 100 °C, 94% para la temperatura inicial de 150 °C y 94.5% para la temperatura inicial de 200 °C. Estos resultados indican que la zeolita y la Al-PILC, dada su capacidad de adsorción de vapor de agua son los medios mas adecuados para la deshidratación de granos en lecho particulado agitado, proporcionando mayores cantidades de agua eliminada con respecto al tiempo que la arena, la cual es uno de los materiales mas utilizados en el secado de granos por este método. Aun, el uso de arcilla para el secado de granos es más recomendable que la arena para este tipo de secado.

Conclusiones

De los materiales utilizados, los mas eficaces para secar trigo fueron la zeolita y la Al-PILC, debido a su capacidad de adsorción de vapor de agua. El menos eficaz fue la arena.

El grado de eliminación de humedad del trigo obtenido con Al-PILC respecto al obtenido por la zeolita varió entre el 83 y 95% dependiendo de la temperatura inicial del medio, siendo mayor para la temperatura de 200 °C.

El trigo alcanza la temperatura más alta al final del proceso cuando es secado con zeolita, seguido por la Al-PILC, posteriormente arcilla y por último la arena en cualquiera de las condiciones de operación utilizadas.

La zeolita y la Al-PILC presentan las mejores características de transferencia de calor y masa puesto que pueden evaporar una mayor cantidad de humedad y transferir al mismo tiempo la mayor cantidad de calor que los otros medios estudiados. La cantidad de calor transferido al trigo por la Al-PILC correspondió entre el 85 y 94.5% del transferido por la zeolita.

Referencias

1. Gaetano, P.; Orozco, F. Manuales de educación agropecuaria. Elaboración de productos agrícolas. 26, 9-20. Trillas, México, **1985**.
2. Richard, P.; Raghavan, G. S.V., in: *Advances in Drying*, Vol. 3, Mujumdar, A.S., Ed., Hemisphere Publishing Corp., Washington, **1984**, 39-63.
3. Raghavan, G. S. V.; Harper, J. M. *Trans. of the ASAE* **1974**, 108-111.
4. Lapp, H. M.; Leung, P. S. K.; Townsend, J. S. ASAE Paper 75-302-NCR. St. Joseph, **1975**.
5. Khan, A. U.; Hussin, A. A.; Arboleda, J. R.; Manalo, A. S. *Trans. of the ASAE* **1974**, 17, 949-955.
6. Sibley, K. J.; Raghavan, G. S. V. *Drying Tech.* **1985**, 1, 75-99.
7. Mittal, G. S.; Lapp, H. M.; Townsend, J. S. *Can. Agric. Eng.* **1985**, 27, 121-125.
8. Raghavan, G. S. V.; Alikhani, Z. in: *Drying '86*, Vol. 2, Mujumdar, A.S., Ed., Hemisphere Publishing Corp., Washington, **1986**, 553-558.
9. Raghavan, G. S. V.; Alikhani, Z.; Fanous, M.; Block, E. *Trans. of the ASAE* **1988**, 31, 1289-1294.
10. Dyer, A.; Gallardo, T.; Roberts, C. W. in: *Zeolites: Facts, Figures, Futures*. Vol. 49A, Jacobsand, P. A.; Van Santen, R. A., Ed., Elsevier Applied Science, London, **1989**, 389-398.
11. Arellano, S.; Gallardo, T.; Osorio, G. *Rev. Soc. Quím. Méx.* **2000**, 44, 204-208.
12. López, S.; Osorio, G.; Gallardo, T.; Arellano, S. *Rev. Soc. Quím. Méx.* **2002**, 46, 140-144.
13. Rouquerol, F.; Rouquerol, J.; Sing, K. *Adsorption by Powders and Powder Solids*. Academic Press, London, U.K. 355-399, **1999**.
14. AOAC.; *Official Methods of analysis of AOAC International*. William Horwitz, Ed., Wisconsin, **2000**.
15. Breck, D. W. *Zeolite, Molecular Sieves: Structure, Chemistry and Use*. Wiley-Interscience, London, **1974**.
16. Incropera, F. P.; DeWitt, D. P. *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., México, **1999**.
17. Pires, J.; Carvahlo, M. B. *J. Mat. Chem.* **1997**, 7, 1901-1904.
18. López, S. M. *Estudio de las propiedades de adsorción de vapor de agua en arcillas naturales, homoionicas y pilarizadas y su comparación con zeolita 13X*. Tesis de Maestría. E.N.C.B.-I.P.N. **1998**.
19. Risvi, S. S. H.; Rao, M. A. *Engineering Properties of Foods*. Marcel Dekker, London. **1995**.