

Estudio de la Aplicación de Ultrasonidos de Alta Intensidad en Sistemas Sólido-Líquido y Sólido-Gas. Influencia en la Cinética de Transporte de Materia y en la Estructura de los Productos

Autor

César Ozuna López

Directores

Dr. Juan Andrés Cárcel Carrión

Dr. José Vicente García Pérez

Resumen

En los últimos años, la aplicación de Ultrasonidos de Alta Intensidad (**US**) en procesos alimentarios ha despertado un gran interés debido a su capacidad para intensificar los fenómenos de transporte de materia. Esta capacidad es atribuida a una serie de mecanismos inducidos por los US que pueden afectar tanto la resistencia interna como la resistencia externa al transporte de materia. Además, la aplicación de US puede influir en la estructura del producto tratado y en consecuencia en su calidad final. Para poder tener un mejor conocimiento de los efectos de los US, tanto en el transporte de materia como en la calidad del producto final, es importante profundizar en la interacción entre la energía acústica y la estructura del alimento. Por lo tanto, el principal objetivo de esta Tesis Doctoral fue evaluar la influencia de los US en el transporte de materia y en la interacción ultrasonidos-estructura del producto en varios sistemas sólido-líquido y sólido-gas.

Respecto a las aplicaciones en sistemas sólido-líquido, se estudió el efecto de los US en el salado de carne y en el desalado de bacalao. En ambos estudios, el principal objetivo fue evaluar la influencia de la aplicación de US en las cinéticas de transporte de agua y NaCl, así como en la microestructura y en las propiedades físicas del producto final. Además, en el salado de carne (5 ± 1 °C), se estudió el efecto de la concentración de NaCl en la salmuera (50, 100, 150, 200, 240 y 280 kg NaCl/m³). En este sentido, se observó que la concentración de la salmuera afectó a la dirección del transporte de agua. Así, a concentraciones inferiores a 200 kg NaCl/m³, las muestras se rehidrataron, mientras que a concentraciones mayores, las muestras sufrieron una

Resumen

deshidratación. En el caso del desalado de bacalao (4 ± 1 °C), se evaluó la aplicación de dos potencias acústicas diferentes. En ambos procesos, se analizó el transporte de materia mediante modelos difusivos. El análisis microestructural se realizó a través de diferentes técnicas: SEM, Cryo-SEM y microscopía óptica. Además, se evaluaron ciertos parámetros físicos del producto final, tales como la dureza y el hinchamiento de las muestras.

Los modelos difusivos describieron de manera adecuada las cinéticas de transporte de agua y NaCl, tanto en salado como desalado, proporcionando una tendencia similar entre los datos experimentales y los calculados. En todos los casos estudiados, la aplicación de US intensificó significativamente ($p < 0.05$) el transporte de materia, incrementando ambas difusividades efectivas (agua y NaCl). Además, en el caso del desalado de bacalao, se observó que al aumentar la potencia acústica aplicada al medio, la intensificación del transporte de materia fue más acusada.

La ganancia de sal en el salado de carne provocó cambios en la textura, así, altos contenidos de NaCl conllevaron muestras más duras. La mayor dureza de la carne salada con US, comparada con la salada de manera convencional, pudo deberse a su contenido más alto de sal. Por otro lado, en el bacalao, el desalado produjo el hinchamiento y el ablandamiento de las muestras. Dichos efectos fueron más evidentes al aplicar US. Mediante el análisis microestructural se observó que, la carne salada con la aplicación de US presentó una distribución más homogénea de NaCl, mientras que en el bacalao desalado, los US produjeron un incremento de la anchura de las fibras musculares.

En sistemas sólido-gas, se estudió la aplicación de US sin contacto directo tanto en el secado por aire caliente como en el secado a baja temperatura. En primer lugar, se estudió la aplicación de US en el secado a baja temperatura de bacalao salado. En este estudio se cuantificó la influencia de los US en las cinéticas de secado y en algunas propiedades físicas del producto final. Así, se realizaron experiencias de secado (2 ± 0.1 m/s) de bacalao salado a diferentes temperaturas (-10, 0, 10 y 20 °C) con (20.5 kW/m^3) y sin la aplicación de US. En las muestras deshidratadas se analizó la capacidad de rehidratación (4 °C), el color, la textura y la microestructura. Con el fin de cuantificar la influencia de la aplicación de US y la temperatura durante el secado, las cinéticas de secado y de rehidratación se modelizaron mediante modelos difusivos y empíricos.

En todas las temperaturas estudiadas, la aplicación de US durante el secado de bacalao incrementó la velocidad del proceso, alcanzando reducciones de tiempo de hasta un 50%. Por otro lado, el modelo difusivo describió adecuadamente las cinéticas de secado proporcionando porcentajes de varianza superiores al 99%. La aplicación de US incrementó significativamente ($p < 0.05$) la difusividad efectiva hasta un 110%. Respecto a las propiedades físicas, las muestras secadas con US fueron más blandas y presentaron una mayor capacidad de rehidratación que las muestras secadas de manera convencional. Este hecho se relacionó con los cambios microestructurales observados, tales como, mayores espacios entre las miofibrillas y una mayor migración de la sal a la superficie de las muestras. Finalmente, la aplicación de US produjo cambios significativos ($p < 0.05$) de color en el producto deshidratado.

En el caso de la aplicación de US en el secado por aire caliente, se evaluó la respuesta de diferentes vegetales ante la energía acústica. Así, se estudió la aplicación de US en el secado por aire caliente (40 °C y 1 m/s) de berenjena, patata, manzana y yuca aplicando diferentes niveles de potencia acústica (0, 6, 12, 19, 25 y 31 kW/m³). La aplicación de US redujo el tiempo de secado en todos los productos analizados. Sin embargo, las reducciones dependieron del producto tratado, oscilando entre un 27%, en el caso de la yuca, y un 68%, para la berenjena.

Con la finalidad de estudiar la influencia de los US tanto en la resistencia interna como en la resistencia externa al transporte de materia, las cinéticas de secado fueron modelizadas mediante modelos difusivos con diferente nivel de complejidad. Para las condiciones experimentales estudiadas, la resistencia externa resultó ser significativa. Así, su consideración en el modelo difusivo incrementó el porcentaje de varianza explicada de un 84%, valor obtenido por el modelo que no considera la resistencia externa, a un 98%. Sin embargo, cuando el encogimiento de la muestra resultó un fenómeno significativo, como en el caso de la berenjena, la difusividad efectiva identificada fue sobreestimada. Es por ello que, el modelo difusivo que considera ambos fenómenos (resistencia externa y encogimiento) se utilizó para describir con mayor precisión las cinéticas de secado de berenjena, alcanzándose porcentajes de varianza explicada superiores al 99% y errores relativos medios inferiores al 1.2%.

La potencia ultrasónica influyó significativamente ($p < 0.05$) en los parámetros cinéticos. Así, se observaron relaciones lineales significativas entre la difusividad efectiva y el coeficiente de transferencia de materia con la potencia ultrasónica

Resumen

aplicada. Por otro lado, la magnitud del incremento de los parámetros cinéticos con el aumento de la potencia acústica aplicada se vio muy influenciado por el producto secado.

Con el objetivo de mejorar la comprensión de cómo la estructura interna del material influye en la efectividad de los US durante el secado, los resultados experimentales de este trabajo para berenjena, patata, yuca y manzana fueron completados con otros ya publicados en trabajos previos sobre zanahoria, piel de naranja y piel de limón. Las cinéticas de secado fueron analizadas mediante un modelo difusivo en el cual se consideró la difusividad efectiva como un parámetro global del transporte de materia. Además, en todos los productos se determinó experimentalmente la porosidad y diversos parámetros texturales, como por ejemplo la dureza, la microestructura y las propiedades acústicas.

La **P**endiente de la relación lineal entre la **D**ifusividad efectiva y la **P**otencia **U**ltrasónica aplicada (**PDPU**) calculada para cada producto se utilizó como una estimación de la efectividad de los US, de manera que mientras mayor fue dicha pendiente, la efectividad de los US se incrementó. Se observó la existencia de una correlación lineal ($r \geq 0.95$) entre PDPU y la porosidad y dureza del producto. Así, en productos que presentaron una mayor porosidad y una menor dureza, la PDPU fue mayor. Además, se observó que las relaciones PDPU vs. impedancia y PDPU vs. coeficiente de transmisión de la energía acústica mostraron un patrón muy similar. Este hecho pone de manifiesto que la aplicación de US en el proceso de secado depende en gran medida de la fracción de energía ultrasónica que penetra en el sólido. Por un lado, los productos más blandos y con una estructura más porosa mostraron una mejor transmisión de la energía acústica y fueron más sensibles a los efectos mecánicos producidos por los US. Por otro lado, los materiales más duros y con una estructura más compacta fueron menos afectados por la energía acústica, debido a la gran diferencia de impedancias entre el producto y el aire, lo cual puede inducir grandes pérdidas de energía en la interfase.

En resumen, a partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se han encontrado diversos factores que son comunes en las aplicaciones de los US en sistemas sólido-líquido y en sólido-gas. En primer lugar, se ha demostrado el potencial de los US para intensificar las cinéticas de transporte de materia en ambos sistemas. Además, en ambos casos, los efectos mecánicos atribuidos a la aplicación de US provocaron

cambios en la estructura del producto, así como también en las propiedades físicas del material tratado que deben de tenerse en cuenta en vistas a preservar la calidad de los productos. Además, en los sistemas sólido-gas, se ha observado la influencia de la estructura del producto en la efectividad de los US durante el secado. Esto se ha atribuido a la diferencia de impedancias entre el aire y el producto.