

Estudi de l'aplicació d'ultrasons d'alta intensitat en sistemes sòlid-líquid i sòlid-gas. Influència en la cinètica de transport de matèria i en l'estructura dels productes

Author

César Ozuna López

Directors

Dr. Juan Andrés Cárcel Carrión

Dr. José Vicente García Pérez

Resum

En els últims anys, l'aplicació d'ultrasons d'alta intensitat (US) en processos alimentaris ha despertat un gran interès a causa de la capacitat que tenen per a intensificar els fenòmens de transport de matèria. Aquesta capacitat és atribuïda a una sèrie de mecanismes induïts pels US que poden afectar tant la resistència interna com la resistència externa al transport de matèria. A més, l'aplicació d'US pot influir en l'estructura del producte tractat i, en conseqüència, en la qualitat final d'aquest. Per a poder tenir un millor coneixement dels efectes dels US, tant en el transport de matèria com en la qualitat del producte final, és important tenir en compte la interacció entre l'energia acústica i l'estructura de l'aliment. Per tant, el principal objectiu d'aquesta tesi doctoral ha sigut avaluar la influència dels US en el transport de matèria i en la interacció ultrasons-estructura del producte en diversos sistemes sòlid-líquid i sòlid-gas.

Respecte a les aplicacions en sistemes sòlid-líquid, hem estudiat l'efecte dels US en el salatge de carn i en el dessalatge de bacallà. En tots dos estudis, el principal objectiu ha sigut avaluar la influència de l'aplicació d'US en les cinètiques de transport d'aigua i NaCl, com també en la microestructura i en les propietats físiques del producte final. A més, en el salatge de carn (5 ± 1 °C), hem estudiat l'efecte de la concentració de NaCl en la salmorra (50, 100, 150, 200, 240 i 280 kg NaCl/m³). En aquest sentit, s'ha observat que la concentració de la salmorra afecta la direcció del transport d'aigua. Així, a concentracions inferiors a 200 kg NaCl/m³, les mostres es van rehidratar, mentre que a concentracions majors, les mostres van sofrir una deshidratació. En el cas del dessalatge de bacallà (4 ± 1 °C), hem avaluat l'aplicació de dues potències

Resum

acústiques diferents. En tots dos processos, hem analitzat el transport de matèria mitjançant models difusius. L'anàlisi microestructural s'ha realitzat a través de diferents tècniques: SEM, Cryo-SEM i microscòpia òptica. A més, hem avaluat certs paràmetres físics del producte final, tals com la duresa i l'inflament de les mostres.

Els models difusius van descriure de manera adequada les cinètiques de transport d'aigua i NaCl, tant en salatge com en dessalatge, i proporcionaren una tendència semblant entre les dades experimentals i les calculades. En tots els casos estudiats, l'aplicació d'US va intensificar significativament ($p < 0.05$) el transport de matèria, amb la qual cosa ambdues difusivitats efectives (aigua i NaCl) van augmentar. En el cas del dessalatge de bacallà, es va observar que l'augment de la potència acústica aplicada al medi va produir una major intensificació del procés.

El guany de sal en el salatge de carn va provocar canvis en la textura, de manera que alts continguts de NaCl van comportar mostres més dures. La major duresa de la carn salada amb US, comparada amb la salada de manera convencional, pot ser causada pel contingut més alt de sal. D'altra banda, el dessalatge va produir l'inflament i l'ablaniment de les mostres. Aquests efectes van ser més evidents en aplicar-hi US.

Mitjançant l'anàlisi microestructural es va observar que, en aplicar-hi US, la carn salada va presentar una distribució més homogènia de NaCl, mentre que en el bacallà dessalat es va observar un increment de l'amplària de les fibres musculars.

En sistemes sòlid-gas hem estudiat l'aplicació d'US sense contacte directe, tant en l'assecatge per aire calent com en l'assecatge a baixa temperatura. En primer lloc, es va estudiar l'aplicació d'US en l'assecatge a baixa temperatura de bacallà salat. En aquest estudi s'ha quantificat la influència dels US en les cinètiques d'assecatge i en algunes propietats físiques del producte final. Així, es van realitzar experiències d'assecatge ($2 \pm 0,1$ m/s) de bacallà salat a diferents temperatures (-10, 0, 10 i 20 °C) amb ($20,5 \text{ kW/m}^3$) i sense l'aplicació d'US. En les mostres tractades es va analitzar la capacitat de rehidratació (4 °C), el color, la textura i la microestructura. A fi de quantificar la influència de l'aplicació d'US i la temperatura durant l'assecatge, les cinètiques d'assecatge i de rehidratació es modelitzaren mitjançant models difusius i empírics.

Per a totes les temperatures estudiades, l'aplicació d'US durant l'assecatge de bacallà salat va incrementar la velocitat del procés, i s'aconseguien reduccions de temps de fins a un 50%. D'altra banda, el model difusiu va descriure adequadament les

cinètiques d'assecatge, i va proporcionar percentatges de variància superiors al 99%. L'aplicació d'US va incrementar significativament ($p < 0,05$) la difusivitat efectiva fins a un 110%. Respecte a les propietats físiques, les mostres assecades amb US van ser més blanques i van presentar una major capacitat de rehidratació que les mostres assecades de manera convencional. Aquest fet es va relacionar amb els canvis microestructurals observats, tals com majors espais entre les miofibril·les i una major migració de la sal a la superfície de les mostres. Finalment, l'aplicació d'US va produir canvis significatius ($p < 0,05$) de color en el producte deshidratat.

En el cas de l'aplicació d'US en l'assecatge per aire calent, hem avaluat la resposta de diverses fruites i vegetals davant de l'energia acústica. Així, es va estudiar l'aplicació d'US en l'assecatge per aire calent (40 °C i 1 m/s) d'albergínia, creïlla, poma i iuca aplicant diferents nivells de potència acústica (0, 6, 12, 19, 25 i 31 kW/m³). L'aplicació d'US va reduir el temps d'assecatge en tots els productes analitzats, però, no obstant això, les reduccions van dependre del producte tractat i van oscil·lar a l'entorn d'un 27%, en el cas de la iuca, i un 68%, per a l'albergínia.

Amb la finalitat d'estudiar la influència dels US tant en la resistència interna com en la resistència externa al transport de matèria, les cinètiques d'assecatge van ser modelitzades mitjançant models difusius amb diferent nivell de complexitat. Per a les condicions experimentals estudiades, la resistència externa va ser significativa. Així, en considerar-la dins del model difusiu, va incrementar el percentatge de variància explicada d'un 84%, valor obtingut pel model que no considera la resistència externa, a un 98%. No obstant això, es va observar que quan l'encongiment de la mostra és un fenomen significatiu, com en el cas de l'albergínia, la difusivitat efectiva identificada està sobreestimada. Per tant, el model difusiu que considera aquests dos fenòmens (resistència externa i encongiment) es va utilitzar per a descriure amb major precisió les cinètiques d'assecatge d'albergínia. S'aconseguien percentatges de variància explicada superiors al 99% i errors relatius mitjans inferiors a l'1,2%

La potència ultrasònica va influir significativament ($p < 0,05$) en els paràmetres cinètics. Així, s'hi van observar relacions lineals significatives entre la difusivitat efectiva i el coeficient de transferència de matèria amb la potència ultrasònica aplicada. Encara que la magnitud de l'increment dels paràmetres cinètics es va veure molt influïda pel producte assecat.

Resum

Amb l'objectiu de millorar la comprensió de com l'estructura interna del material influeix en l'efectivitat dels US durant l'assecatge, els resultats experimentals d'aquest treball van ser completats amb altres ja publicats en treballs previs sobre carlota, pell de taronja i pell de llima. Les cinètiques d'assecatge van ser analitzades mitjançant un model difusiu en el qual es va considerar la difusivitat efectiva com un paràmetre global del transport de matèria. A més, en tots els productes es va determinar experimentalment la porositat, diversos paràmetres texturals, com per exemple la duresa, la microestructura i les propietats acústiques.

El pendent de la relació lineal entre la difusivitat efectiva i la potència ultrasònica aplicada (**PDPU**) calculada per a cada producte es va utilitzar com una estimació de l'efectivitat dels US. Per a valors majors del pendent, l'efectivitat dels US es va incrementar. Es va observar l'existència d'una correlació lineal ($r=0,95$) entre PDPU i la porositat i la duresa del producte. Així, en productes que van presentar una major porositat i una menor duresa, la PDPU va ser major. A més, es va observar que la relació PDPU i la impedància i PDPU i el coeficient de transmissió de l'energia acústica van mostrar una tendència molt semblant. Per tant, aquest fet posa de manifest que l'aplicació d'US en el procés d'assecatge depèn en gran manera de la fracció d'energia ultrasònica que penetra en el sòlid. D'una banda, els productes més blans i amb una estructura més porosa van mostrar una millor transmissió de l'energia acústica i van ser més sensibles als efectes mecànics produïts pels US. D'una altra banda, els materials més durs i amb una estructura més compacta van ser menys afectats per l'energia acústica, a causa de la gran diferència d'impedàncies entre el producte i l'aire, la qual cosa pot induir grans pèrdues d'energia en la interfase.

En resum, amb els resultats obtinguts en aquest treball, s'han trobat diversos fets que són comuns en les aplicacions dels US tant en sistemes sòlid-líquid com en sòlid-gas. En primer lloc, s'ha demostrat el potencial dels US per a intensificar les cinètiques de transport de matèria en aquests dos sistemes. A més, en tots dos casos, els efectes mecànics atribuïts a l'aplicació d'US van provocar canvis en l'estructura del producte, com també en les propietats físiques del material tractat que han de ser considerades per a preservar la qualitat dels productes. No obstant això, també s'han trobat alguns fets particulars dels sistemes estudiats. Per exemple, en sistemes sòlid-gas, l'estructura del producte va influir en gran manera en l'efectivitat dels US durant l'assecatge a causa de la gran diferència d'impedàncies entre l'aire i el producte.