

Cavitazione acustica per mezzo di ultrasuoni nell'estrazione di olio extra vergine di oliva

In questo articolo si mostra il progetto, la realizzazione e i test sperimentali del primo impianto ad ultrasuoni integrato di uno scambiatore di calore caldo/freddo (Sono-Heat-Exchanger), destinato all'industria dell'olio extra vergine di oliva, con lo scopo di ottenere la migliore qualità del prodotto con la più alta efficienza. È stata utilizzata una simulazione CFD 3D multifase, come strumento per il design del Sono-Heat-Exchanger (SHE). L'impianto, installato tra il frangitore ed il decanter, ha prodotto risultati importanti in sperimentazione industriale, relativi a rese e contenuto fenolico, che dimostrano la grande importanza di questa innovazione.

ACOUSTIC CAVITATION BY MEANS ULTRASOUNDS IN THE EXTRA VIRGIN OLIVE OIL EXTRACTION PROCESS

This paper shows how the authors have designed, realized and tested the first in the world continuous ultrasonic full-scale device for the extra virgin olive oil industry, with the aim to obtain the best product quality at the highest efficiency. A 3D multiphase CFD analysis was used as auxiliary tool in the design a so-called Sono-Heat-Exchanger (SHE). This innovative device, to be placed between the crusher and the decanter, is a combination of a heat-exchanger with plate-shape ultrasonic transducers. Finally, experimental results about yields and phenols contents demonstrated the relevance of this innovation.

INTRODUZIONE

I trattamenti ad ultrasuoni nell'industria alimentare sono ritenuti notevolmente efficaci [1-3] con costi di operatività e manutenzione contenuti [4]. Più di recente diverse evidenze scientifiche hanno messo in luce che gli US hanno una promettente applicazione nel campo dell'industria dell'olio extra vergine d'oliva, grazie agli effetti meccanici e termici utili a garantire un'elevata resa di produzione (così da ridurre il tempo di processo) e migliorare l'efficienza del processo produttivo [5-7]. Modesti effetti termici si verificano per effetto dell'energia cinetica indotta dalle onde ultrasoniche, che in parte si converte in energia termica a causa all'incremento dell'agitazione della materia [8,9]. Per quanto concerne l'effetto meccanico, questo è dovuto agli effetti indotti della cavitazione acustica. In altre parole, quando gli ultrasuoni sono applicati ad un fluido continuo, producono onde di pressione pressoché sinusoidali, che inducono bolle di vapore se la pressione locale scende al di sotto della tensione di vapore [10,11]. Dopo che la crescita delle bolle ha raggiunto una dimensione critica, queste implodono dando origine a condizioni locali estreme (onde d'urto e getti di liquido ad alta velocità), che promuovono la rottura dei solidi che si trovano nel mezzo liquido, aumentando così tanto la superficie solida totale a contatto con la fase liquida, quanto il trasferimento di massa [10,12-15].

Nel caso della pasta franta di olive, ovvero quella ottenuta a valle del processo di frangitura, la cavitazione acustica promuove una rottura della struttura tissutale, incluse le membrane di elaioplasti (cioè leucoplasti specializzati, protetti da una membrana cellulare, responsabili della conservazione dei lipidi) che liberano la fase oleosa intrappolata [16,17]. In tal modo, l'applicazione alla pasta di olive di onde di pressione generate da ultrasuoni può effettivamente incrementare il rilascio dei composti nutraceutici dal frutto [18]. Inoltre, gli ultrasuoni possono

incrementare la coalescenza, aumentando la probabilità di collisione tra le particelle [17,19]. Con riferimento all'attuale processo di estrazione, i metodi meccanici impiegati nell'estrazione di olio extra vergine di oliva sono generalmente costituiti da macchine operanti in continuo, frangitore meccanico, separatori centrifughi ad asse orizzontale e verticale, con la sola eccezione delle gramole. Infatti, il frangitore e i separatori centrifughi operano in maniera totalmente continua, mentre la gramola rappresenta un processo con sosta [20], all'interno della quale si opera un rimescolamento della pasta franta per diversi minuti (da 10 a 60 min). Inoltre, la gramola viene utilizzata come scambiatore di calore, pur non avendo una efficienza progettuale in tal senso, perché caratterizzata da un non favorevole rapporto tra il suo grande volume e la sua piccola superficie di scambio [6].

Il patrimonio olivicolo determina in Italia una potenziale risorsa economica e sociale nell'area Mediterranea [21-27], questo perché l'olio extra vergine di oliva è il principale componente della dieta Mediterranea, grazie ai suoi eccellenti valori nutrizionali [28]. Per tale ragione è di grande interesse industriale sviluppare soluzioni innovative e sostenibili in grado di incrementare simultaneamente resa e qualità del processo di estrazione dell'olio extra vergine di oliva [20,29,30], possibilmente attraverso un processo totalmente continuo [31]. Per questa ragione sono costantemente crescenti gli sforzi della ricerca per la progettazione di macchine avanzate in grado di coniugare queste diverse esigenze [6,19,32] e, per le medesime ragioni, gli ultrasuoni ad alta potenza e bassa frequenza rappresentano una soluzione molto promettente in grado di ridurre la durata della gramolazione e, allo stesso tempo, aumentare sia la resa che la qualità del prodotto risultante.

Clodoveo et al.[33], già nel 2013, testarono in scala pilota il trattamento ad ultrasuoni sulla pasta franta di olive, prima della gramolazione, con

risultati che consentivano una riduzione della durata della fase di gramolazione ed un aumento della resa di olio, nonché del contenuto in composti minori. Tra il 2015 e il 2016, sono stati confermati i risultati ottenuti da Clodoveo, come riportato nei lavori di Amirante e la stessa Clodoveo [16,31,34], relativi all'applicazione industriale della medesima tecnica. In ognuno di queste evidenze scientifiche, l'effetto degli ultrasuoni, non ha in alcun modo compromesso i parametri indicativi della qualità dell'olio, inoltre le caratteristiche nutrizionali e sensoriali non hanno mostrato cambiamenti nella composizione degli acidi grassi e nei composti volatili del prodotto estratto. Le prime versioni dell'impianto in scala reale, presentato in precedenti memorie, adottavano delle sonde US "a stelo" immerse nel flusso di pasta. Questa condizione, in ragione della particolare reologia delle stesse e della loro eterogeneità, non costituisce il modo migliore per favorire lo scambio di energia a mezzo di US ed il transito stesso della pasta. Per tale ragione gli autori hanno ritenuto possibile un importante ulteriore miglioramento dell'impianto, definendo una nuova geometria, completamente rivisitata rispetto alle precedenti versioni del "sono-exchanger" e con diversa tipologia di trasduttori. Nel presente lavoro, viene quindi descritto un dispositivo in grado di erogare simultaneamente il trattamento a ultrasuoni e il condizionamento termico (riscaldamento o raffreddamento) alla pasta di olive, grazie alla presenza di trasduttori di ultrasuoni a piastra, che non interferiscano col flusso, e di uno scambiatore di calore, rendendolo unico al mondo nel suo genere.

IL PROCESSO DI ESTRAZIONE DELL'OLIO EXTRA VERGINE DI OLIVA E L'INTRODUZIONE DEGLI ULTRASUONI

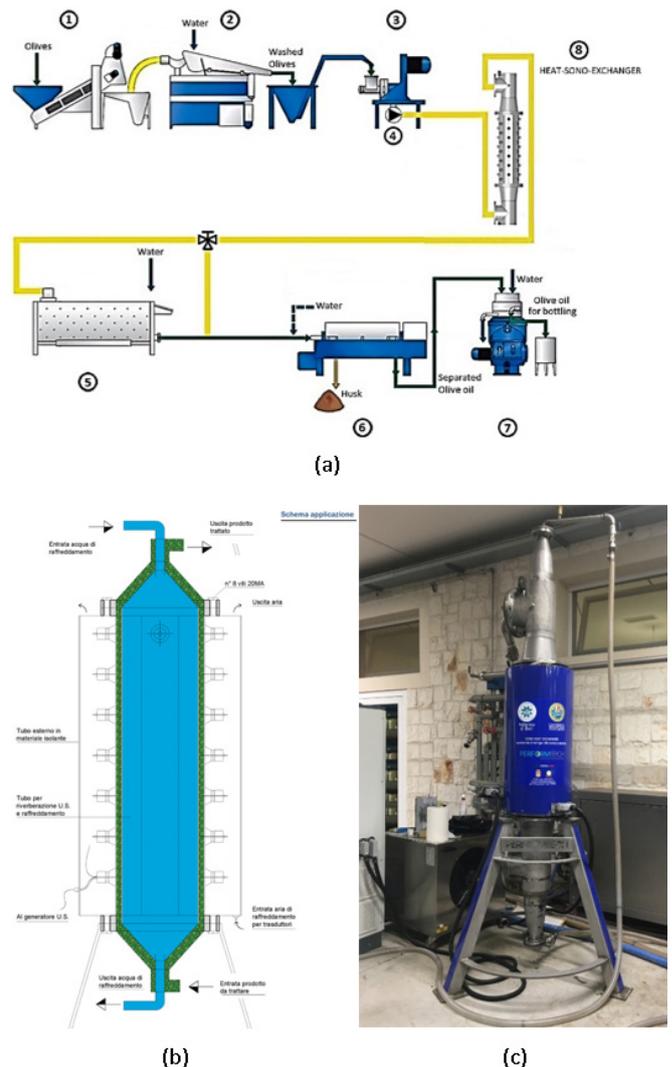
Nel processo di estrazione dell'extra vergine cosiddetto "continuo" (Figura 1 a), le olive raccolte dagli alberi e conferite nel frantoio, vengono avviate, nel più breve tempo possibile, ad una tramoggia che accompagna i frutti ad un piano vibrante (1), con l'obiettivo di rimuovere le foglie e altri detriti e proteggere l'impianto di estrazione, nonché evitare la contaminazione derivante dalla presenza di corpi estranei. Successivamente, le olive vengono lavate (2) per rimuovere possibili residui e poi introdotte nel frangitore (3), con l'obiettivo di trasformare il prodotto in una pasta pompabile e, nel contempo, assicurare la rottura delle cellule vegetali per determinare il rilascio dell'olio. La pasta di olive ottenuta viene spostata nella fase successiva mediante una tubazione ed una pompa volumetrica (4). Prima dell'introduzione del SHE, la gramolazione rappresentava lo step successivo (5). Tale processo è ottenuto in un serbatoio cilindrico - o semi cilindrico - (detto gramola), per lo stazionamento della pasta per un tempo variabile tra i 10 ed i 60 minuti. La gramola è dotata nel suo interno di un albero in lenta rotazione, dotato di bracci e lame in acciaio inossidabile per garantire il lento rimescolamento del prodotto. La superficie laterale della gramola permette di determinare un riscaldamento della pasta attraverso una intercapedine, in cui viene generalmente immessa acqua calda (40-50°C), con l'obiettivo di ottenere le migliori condizioni per l'attivazione dei processi enzimatici, favorire il fenomeno della coalescenza ovvero dell'aggregazione di goccioline d'olio in macro gocce, e per ridurre la viscosità della pasta al fine di migliorare la successiva separazione ottenuta, successivamente, grazie ad un campo di forze centrifughe. Condizioni estreme di temperatura della pasta (superiori a 27°C), pur determinando un abbassamento ulteriore della viscosità della pasta, e conseguentemente un incremento dell'efficienza estrattiva, accelerano i fenomeni ossidativi del prodotto, determinando

un peggioramento della qualità del prodotto.

Una volta completato il processo di gramolazione, la pasta viene inviata in una centrifuga orizzontale chiamata "decanter" (6), che esegue la separazione della fase oleosa dalle altre fasi, solida (sansa) e acquosa (acque di vegetazione), grazie all'azione di un campo di forze centrifughe ottenuto con la rotazione di un tamburo a velocità notevoli (superiori a 3500 RPM).

Una certa quantità di acqua può essere o meno aggiunta (lavorazione a tre fasi o a due fasi rispettivamente) per ulteriormente abbassare la viscosità della pasta in entrata al decanter, con l'obiettivo, suggerito dalla legge di Stokes, di aumentare la velocità di sedimentazione ed incrementare l'efficienza di estrazione, nella consapevolezza però di determinare un dilavamento e quindi un impoverimento delle sostanze fenoliche nell'olio. Infine, una centrifuga verticale (7) consente di chiarificare la fase oleosa. Da tale descrizione è abbastanza evidente che

FIGURA 1 - Schema impiantistico per l'estrazione dell'olio extra vergine di oliva.(a). Sezione longitudinale della macchina (b) e prototipo realizzato (c) del Sono-Heat-Exchanger (SHE)



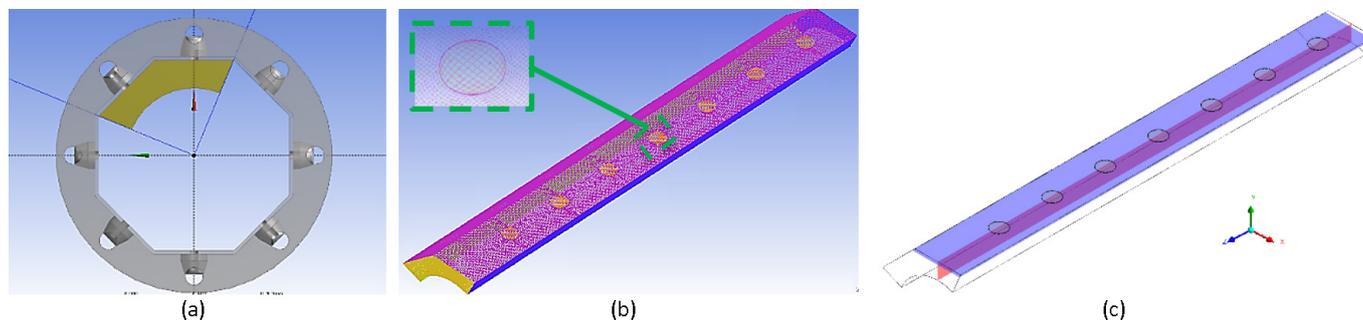


FIGURA 2 - Definizione (a) e discretizzazione (b) del dominio di calcolo utilizzato per le simulazioni fluidodinamiche. Piani di sezione utilizzati per rappresentare l'evoluzione dei campi delle principali variabili fluidodinamiche utili a descrivere le condizioni di flusso all'interno del SHE (c)

le regolazioni attuabili per massimizzare la resa (aggiunta di acqua e incremento delle temperature di processo in gramola) penalizzano la qualità del prodotto ottenuto. In tale scenario si inserisce l'impianto per la somministrazione di ultrasuoni, con l'ambizioso obiettivo di incrementare contemporaneamente resa e qualità. Come si può osservare dalla medesima Figura 1a, l'impianto è montato a valle del frangitore e precede la gramola (8). Dalla Figura 1b si possono scorgere le sezioni di scambio termico tra fluido condizionante (acqua e glicole alimentare ricircolante attraverso un chiller) e la superficie sonicante realizzata da trasduttori a piastra. La pasta di olive scorre dal basso verso l'alto nella sezione anulare esterna, mentre il liquido condizionante scorre attraverso la sezione interna per controllare la temperatura all'interno della pasta di olive (freddo o caldo). L'insieme dei trasduttori, fissati sulla superficie laterale esterna, deve assicurare 15-18 kJ/kg di energia specifica alla pasta, a non oltre 30 kHz [29,33], per ottenere i risultati auspicati nei lavori precedenti. La potenza complessivamente installata (5.5 kW) definisce la massima portata che il SHE può lavorare (1500 kg/h) e la cui forma definitiva è riportata nella foto di Figura 1c.

PROGETTAZIONE DEL SHE

Il processo di design tramite il quale si è arrivati alla definizione delle geometrie ottimali per lo scambio di energia tra trasduttori e pasta è stato svolto con l'ausilio di tecniche di fluidodinamica computazionale volte ad analizzare l'interazione multi-fisica derivante dall'utilizzo di ultrasuoni ad alta potenza. Il dominio di calcolo utilizzato è rappresentato dal volume di fluido occupato dalla pasta franta di olive durante il transito attraverso il SHE (dal basso verso l'alto). Si tratta di un prisma ottagonale cavo che, sfruttando l'assial-simmetria della macchina, nel calcolo è ridotto ad un quarto dell'intera geometria (cfr. Figura 2a), permettendo una notevole riduzione del tempo computazionale.

La discretizzazione del dominio di calcolo tridimensionale, risultato di miglior compromesso in termini di accuratezza della soluzione e costo computazionale, è mostrato nella Figura 2b. La griglia computazionale, interamente strutturata, è composta da circa un milione e mezzo di elementi. In Figura 2b sono evidenziate le parti appena descritte, ovvero quelle occupate da ciascun trasduttore e per le quali è stata definita un'opportuna legge di movimentazione per riprodurre la frequenza indotta dal driver di comando (23 kHz).

La soluzione del flusso si è ottenuta per mezzo del codice di calcolo

commerciale Ansys Fluent 17.1, all'interno del quale il flusso è stato considerato come laminare, ipotesi resa verosimile dall'alta viscosità che caratterizza la pasta franta di olive e per la quale è stato osservato che il flusso che la caratterizza, all'interno degli impianti di estrazione dell'olio di oliva, rimane laminare anche in presenza di grandi portate [35]. Inoltre la pasta di olive è stata modellata come fluido non-Newtoniano, per i motivi ampiamente discussi in un lavoro precedente [6], che segue l'ipotesi di liquido-compressibile descritta dall'equazione di Tait [36], caratterizzato da un valore di densità pari a 1126 kg/m³ (come proposto in [6]), un coefficiente rappresentativo del "bulk-modulus" pari a 1.6e+09 ed un "density exponent" pari a 11. Per le simulazioni in transitorio si è utilizzato il modello di Schnerr atto a definire il flusso non-stazionario soggetto a processi localizzati di cavitazione [37]. In particolare, si è impostato un "bubble number density" pari a 1e+09 ed un valore della tensione di vapore circa pari a quella dell'acqua nelle condizioni operative di temperatura (3540 Pa). Determinante per il calcolo è la scelta del "time step", nella simulazione in oggetto pari ad un decimo del singolo periodo di oscillazione. Tale scelta ha permesso di ottenere una buona accuratezza temporale nella soluzione del flusso non-stazionario che consentisse di catturare i fenomeni transitori caratterizzanti il flusso in esame. Ulteriori dettagli sono riportati in [38].

RISULTATI NUMERICI

Preliminarmente alle simulazioni dinamiche sono state condotte delle simulazioni stazionarie sul dominio di calcolo sopra descritto, con lo scopo di valutare un aspetto cruciale per lo sviluppo del progetto del SHE, ovvero la stima delle perdite di carico cui la pasta di olive che attraversa il dispositivo va incontro a causa degli attriti viscosi a parete. In particolare, è stata stimata una perdita di pressione lungo il dispositivo pari a 0.12 bar ed in più, tale analisi ha permesso di valutare che il campo di pressione instaurato sotto la superficie di ogni trasduttore è sufficientemente uniforme per garantire un efficiente scambio di energia tra la parte mobile e la pasta di oliva, nell'ottica di un efficace somministrazione del trattamento ultrasonico.

Per descrivere in maniera accurata i risultati ottenuti dalle simulazioni non-stazionarie qui presentate si analizzeranno i campi delle principali variabili fluidodinamiche utili a descrivere le condizioni di flusso all'interno del SHE, utilizzando le sezioni evidenziate in Figura 2c.

Nella Figura 3a è riportata l'evoluzione nel tempo della frazione di

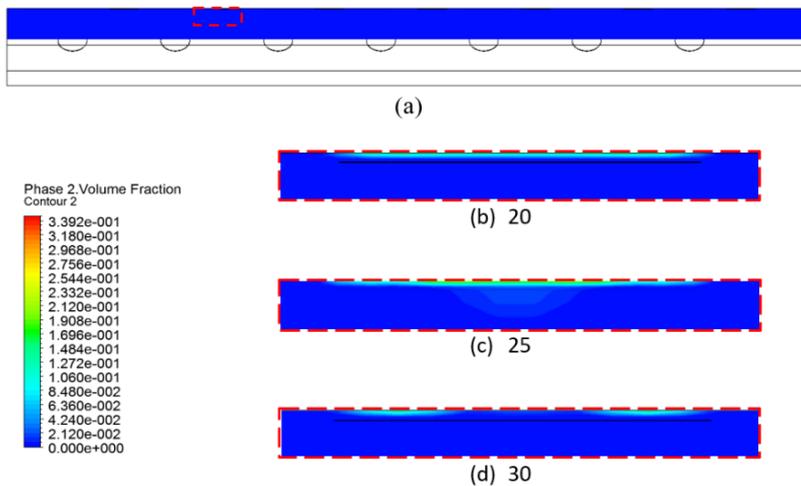


FIGURA 3 - Evoluzione nel tempo della frazione di volume (a) dopo 20 (b) 25 (c) e 30 (d) time-step.

Le sotto-figure (b), (c) e (d) offrono i valori registrati nelle vicinanze della superficie del trasduttore ultrasonico. Ogni time-step corrisponde ad un decimo del periodo completo di oscillazione (23 kHz). All'inizio della simulazione il trasduttore comincia a muoversi per una semi-corsa verso il basso

volume di vapore a ridosso della superficie dei trasduttori ultrasonici indotta dai transitori di pressione. Dalla Figura 3a si evince che la fase vapore compare in una regione collocata vicino alla superficie oscillante del singolo trasduttore. Una visione più dettagliata, riportata nelle Figure 3 (b), (c) e (d), mostra come il vapore cominci a formarsi non appena il trasduttore muove verso l'alto. Una volta formatesi, le bolle di vapore accrescono la loro dimensione, cosicché la quantità di vapore registrata nelle regioni adiacenti alle superfici dei trasduttori raggiunge un massimo pari a circa il 40% in volume (Figura 3c). Quando poi la pressione comincia ad aumentare, per effetto di una nuova corsa di compressione indotta dal trasduttore, le bolle di vapore si trovano circondate da un accresciuto campo di pressione e non sono più in equilibrio con quest'ultimo e dunque collasano.

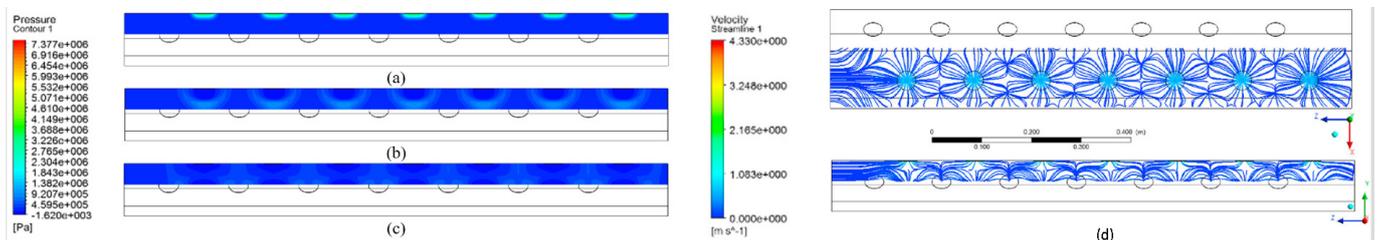
Mentre la frazione di vapore si localizza in uno spazio ristretto nell'entro del campo di azione del trasduttore, la propagazione delle intense onde di pressione prodotte dall'oscillazione degli ultrasuoni, genera effetti molto più globali e macroscopici, così come è possibile apprezzare dalla Figura 4. Durante la corsa di compressione del trasduttore, si registra un drastico aumento di pressione locale, al di sotto della superficie del trasduttore stesso (Figura 4a). Tuttavia, questa intensa onda di pressione si propaga rapidamente e attraversa l'intero dominio seguendo un andamento pressoché sferico. Solo quando essa raggiunge la parete opposta, la sua intensità si attenua per effetto dell'interazione con la parete e dell'alta viscosità che caratterizza il fluido in esame (Figure 4 (b) e (c)). Il fronte sferico dell'onda di compressione che si propaga nel flusso determina un temporaneo e periodico intralcio per il flusso di pasta che si muove assialmente dalla sezione di ingresso a quella di uscita del SHE,

generando dei percorsi tortuosi e dei rimescolamenti moto simili a quelli indotti in una gramola. Questo aspetto è mostrato nella Figura 4d, nella quale si scorge chiaramente l'andamento delle linee di flusso, dove la scala di colori rappresenta l'intensità del modulo della velocità. L'effetto di mescolamento, risultante dall'interazione tra i due moti fluidi sovrapposti, è un effetto sicuramente benefico in termini di efficacia del processo di estrazione dell'olio, in quanto facilita la coalescenza; tuttavia, se non vi è un corretto dimensionamento dell'altezza della sezione di passaggio, gli effetti possono essere o trascurabili (giacché non investono tutto lo spessore della pasta in transito) o negativi indicendo un fenomeno di bloccaggio del flusso per effetto dei globi di pressione. In altre parole, una sezione di passaggio "sottile" è desiderabile se l'obiettivo è quello di massimizzare l'efficacia dell'interazione ultrasonica con la pasta. Ma tale soluzione, se estremizzata, porterebbe a condizioni per le quali il flusso potrebbe essere del tutto bloccato dall'incontro di un'onda di compressione avversa alla direzione del flusso, oppure anche forzato ad aggirare l'onda sferica allontanandosi dalla regione interessata al formarsi delle bolle di cavitazione. Pertanto, la scelta di un'appropriata altezza della sezione di passaggio del flusso rappresenta un compromesso fondamentale tra questi due effetti antitetici.

DESCRIZIONE DEGLI EFFETTI RISCONTRATI SU QUALITÀ DEL PRODOTTO E RESA DI ESTRAZIONE

Una volta progettato il SHE, si è verificata la bontà delle scelte effettuate attraverso un'estesa campagna sperimentale. La resa di estrazione (EYE-VOO misurata come peso di olio estratto per ogni 100 kg di peso delle olive) e il contenuto fenolico sono stati determinati seguendo la procedura

FIGURA 4 - Evoluzione nel tempo del campo di pressione dopo 5 (a), 15 (b) e 25 (c) time-step. Linee di flusso a 25 time-step (d). La scala di colori usata per colorare le linee di flusso rappresenta il modulo della velocità



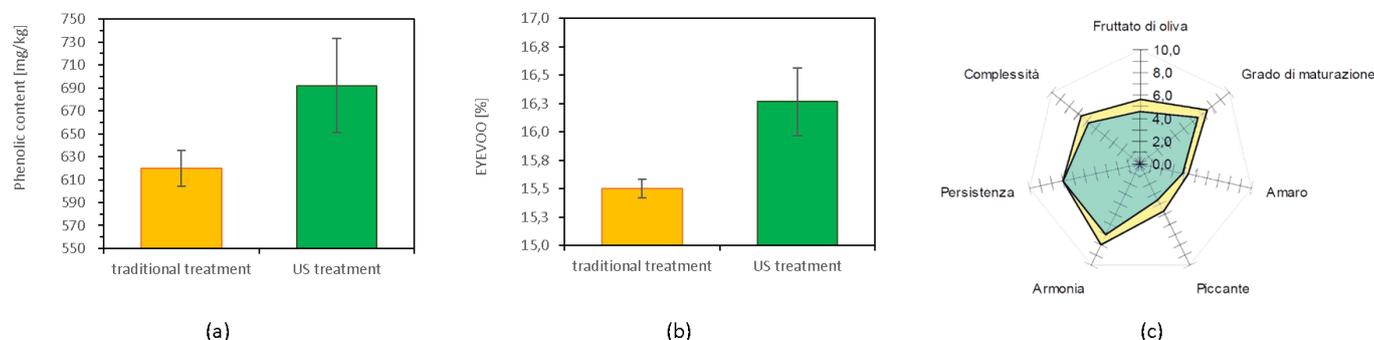


FIGURA 5 - Confronto tra il processo di estrazione tradizionale e quello agli ultrasuoni per quel che concerne il contenuto fenolico (a) e la resa di estrazione (b). Risultati dell'analisi sensoriale (c): in giallo quella relativa al campione di extra vergine non trattato, in verde quella relativa agli oli trattati con ultrasuoni

descritta in dettaglio in un lavoro precedente [6]. Le prove sperimentali descritte in questo lavoro sono state eseguite presso il frantoio "le tre colonne", sito in Giovinazzo durante la campagna di raccolta 2016/2017. Grazie a queste prove è stato possibile comparare la qualità dell'olio extra vergine e le rese di estrazione ottenibile con il trattamento ultrasonico delle paste, rispetto al processo tradizionale. Tale confronto è mostrato in Figura 5. In particolare, la Figura 5a mostra come il contenuto polifenolico sia stato accresciuto mediamente del 12% mediante la stimolazione ultrasonica. Il dato estremo rilevante, visto che non si conoscono precedenti nella letteratura scientifica né tantomeno in soluzioni impiantistiche esistenti, è che all'incremento del contenuto fenolico è corrisposto un contemporaneo aumento della resa estrattiva di circa un punto percentuale (incremento del 5% rispetto al processo tradizionale). A completamento delle indagini compiute macroscopicamente e analiticamente, non minore importanza riveste l'analisi sensoriale condotta da un gruppo panel, in quanto trattasi di un prodotto anche dall'alto valore edonistico. La Figura 5c contempla i risultati delle due analisi sensoriali compiute da un panel ufficiale sui campioni sonicati e non. In particolare, si può notare che il profilo aromatico è simile per entrambi, tanto da assicurare la riconoscibilità dell'impronta varietale (trattasi di cultivar coratina in purezza). Un'ulteriore constatazione positiva è relativa alla punta di amaro (nonché di piccante), leggermente ridimensionata nei campioni ottenuti con ultrasuoni, pur con un più alto valore di fenoli riscontrati. Tale risultato è a vantaggio dell'accettabilità del consumatore, il quale spesso rifiuta (a torto) oli con intense note amare e piccanti.

CONCLUSIONI

Lo scopo del presente lavoro è stato quello di progettare, realizzare e testare un dispositivo continuo ad ultrasuoni e scambio termico, denominato "Sono-Heat-Exchanger", destinato all'industria di estrazione dell'olio extra vergine di oliva, grazie al quale è stato possibile aumentare simultaneamente la capacità di lavoro, la resa di estrazione ed il contenuto di fenoli.

La tecnologia ad ultrasuoni è in grado di indurre la rottura delle pareti cellulari grazie al fenomeno della cavitazione acustica, recuperando l'olio ed i composti minori intrappolati nel tessuto delle olive scappato integro alla frangitura tradizionale. Come strumento di calcolo, è stata impiegata un'analisi CFD multifase e tridimensionale, quale strumento

per dimensionare correttamente il dimostratore. L'analisi fluidodinamica è stata eseguita mediante un software commerciale per prevedere il percorso del flusso in prossimità dei dispositivi ad ultrasuoni a piastre, allo scopo di valutare i parametri del flusso. L'influenza di ciascun parametro geometrico è stata valutata per ottimizzare il SHE ed i risultati dimostrano che le cadute di pressione e i campi di velocità sono adatti per garantire la migliore diffusione degli ultrasuoni. In particolare, le simulazioni in transitorio hanno evidenziato che la fase vapore viene generata in una regione situata nelle vicinanze della superficie del trasduttore, ma che la propagazione delle onde di pressione influenza macroscopicamente tutto il flusso della pasta d'olive. Pertanto, la sezione trasversale del SHE è stata progettata per ottenere un ragionevole compromesso tra la necessità di massimizzare l'effetto ultrasonico riducendo gli effetti di interferenza tra i trasduttori. I test sperimentali, eseguiti su un impianto in scala reale, hanno dimostrato il simultaneo aumento delle rese di olio e del contenuto di polifenoli nell'olio extra vergine d'oliva trattato, nonché una impronta sensoriale decisamente apprezzabile.

BIBLIOGRAFIA

1. Chemat F, Khan MK, others. Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. *Ultrason Sonochem* 2011;18:813-35.
2. Chandrapala J, Oliver C, Kentish S, Ashokkumar M. Ultrasonics in food processing. *Ultrason Sonochem* 2012;19:975-83.
3. Ashokkumar M. Applications of ultrasound in food and bioprocessing. *Ultrason Sonochem* 2015;25:17-23.
4. Patist A, Bates D. Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. *Innov Food Sci Emerg Technol* 2008;9:147-54.
5. Jiménez A, Beltrán G, Uceda M. High-power ultrasound in olive paste pretreatment. Effect on process yield and virgin olive oil characteristics. *Ultrason Sonochem* 2007;14:725-31.
6. Clodoveo ML, Moramarco V, Paduano A, Sacchi R, Di Palma T, Crupi P, et al. Engineering design and prototype development of a full scale ultrasound system for virgin olive oil by means of numerical and experimental analysis. *Ultrason Sonochem* 2017.
7. Cravotto G, Boffa L, Mantegna S, Perego P, Avogadro M, Cintas P. Improved extraction of vegetable oils under high-intensity ultrasound

- and/or microwaves. *Ultrason Sonochem* 2008;15:898–902.
8. Amirante P, Clodoveo ML, Dugo G, Leone A, Tamborrino A. Advance technology in virgin olive oil production from traditional and de-stoned pastes: Influence of the introduction of a heat exchanger on oil quality. *Food Chem* 2006;98:797–805.
 9. Legay M, Simony B, Boldo P, Gondrexon N, Le Person S, Bon-temps A. Improvement of heat transfer by means of ultrasound: application to a double-tube heat exchanger. *Ultrason Sonochem* 2012;19:1194–200.
 10. Amirante R, Distaso E, Tamburrano P. Experimental and numerical analysis of cavitation in hydraulic proportional directional valves. *Energy Convers Manag* 2014;87:208–19.
 11. Amirante R, Distaso E, Tamburrano P. Sliding spool design for reducing the actuation forces in direct operated proportional directional valves: Experimental validation. *Energy Convers Manag* 2016;119:399–410.
 12. Roy RA. Cavitation sonophysics. *Sonochemistry and Sonoluminescence* 1999;524:25–38.
 13. Seya PM, Desjoux C, Béra J-C, Insera C. Hysteresis of inertial cavitation activity induced by fluctuating bubble size distribution. *Ultrason Sonochem* 2015;27:262–7.
 14. Desjoux C, Fouqueray M, Lo CW, Seya PM, Lee JL, Bera J-C, et al. Counterbalancing the use of ultrasound contrast agents by a cavitation-regulated system. *Ultrason Sonochem* 2015;26:163–8.
 15. Santos HM, Lodeiro C, Capelo-Martínez J-L. Power ultrasound meets proteomics. *Ultrasound Chem Anal Appl* 2008:107–27.
 16. Amirante R, Paduano A. Ultrasound in Olive Oil Extraction. In: Boskou D, Clodoveo ML, editors. *Prod. from Olive Tree*. 2016th ed., *InTech*; 2016. doi:10.5772/64765.
 17. Clodoveo ML, Hbaieb RH, Kotti F, Mugnozza GS, Gargouri M. Mechanical strategies to increase nutritional and sensory quality of virgin olive oil by modulating the endogenous enzyme activities. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 2014;13:135–54.
 18. Clodoveo ML, Durante V, La Notte D, Punzi R, Gambacorta G. Ultrasound-assisted extraction of virgin olive oil to improve the process efficiency. *Eur J Lipid Sci Technol* 2013;115:1062–9.
 19. Clodoveo ML, Dipalmo T, Schiano C, La Notte D, Pati S. What's now, what's new and what's next in virgin olive oil elaboration systems? A perspective on current knowledge and future trends. *J Agric Eng* 2014;45:49–59.
 20. Clodoveo ML. New advances in the development of innovative virgin olive oil extraction plants: Looking back to see the future. *Food Res Int* 2013;54:726–9.
 21. Amirante R, Clodoveo ML, Distaso E, Ruggiero F, Tamburrano P. A tri-generation plant fuelled with olive tree pruning residues in Apulia: An energetic and economic analysis. *Renew Energy* 2016;89:411–21.
 22. Amirante R, Distaso E, Tamburrano P. Novel, cost-effective configurations of combined power plants for small-scale cogeneration from biomass: Design of the immersed particle heat exchanger. *Energy Convers Manag* 2017;148:876–94. doi:10.1016/j.enconman.2017.06.047.
 23. Amirante R, Cassone E, Distaso E, Tamburrano P. Overview on recent developments in energy storage: Mechanical, electrochemical and hydrogen technologies. *Energy Convers Manag* 2017;132:372–87. doi:10.1016/j.enconman.2016.11.046.
 24. Amirante R, Coratella C, Distaso E, Tamburrano P. A small size combined system for the production of energy from renewable sources and unconventional fuels. *Energy Procedia* 2015;81:240–248. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.090.
 25. Amirante R, De Palma P, Distaso E, Tamburrano P. Thermodynamic analysis of small-scale externally fired gas turbines and combined cycles using turbo-compound components for energy generation from solid biomass. *Energy Convers Manag* 2018;166. doi:10.1016/j.enconman.2018.04.055.
 26. Amirante R, De Palma P, Distaso E, Pantaleo AM, Tamburrano P. Thermodynamic analysis of a small scale combined cycle for energy generation from carbon neutral biomass. *Energy Procedia*, vol. 129, 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.213.
 27. Amirante R, De Palma P, Distaso E, La Scala M, Tamburrano P. Experimental prototype development and performance analysis of a small-scale combined cycle for energy generation from biomass. *Energy Procedia*, vol. 126, 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.08.294.
 28. Clodoveo ML, Camposeo S, De Gennaro B, Pascuzzi S, Roselli L. In the ancient world, virgin olive oil was called “liquid gold” by Homer and “the great healer” by Hippocrates. Why has this mythic image been forgotten? *Food Res Int* 2014;62:1062–8.
 29. Clodoveo ML, Camposeo S, Amirante R, Dugo G, Cicero N, Boskou D. Research and Innovative Approaches to Obtain Virgin Olive Oils With a Higher Level of Bioactive Constituents. *Olive Olive Oil Bioact. Const.*, Elsevier Inc.; 2015, p. 179–215.
 30. Clodoveo ML. Malaxation: Influence on virgin olive oil quality. Past, present and future—An overview. *Trends Food Sci Technol* 2012;25:13–23.
 31. Amirante, Riccardo and Clodoveo ML. Developments in the design and construction of continuous full-scale ultrasonic devices for the EVOO industry. *Eur J Lipid Sci Technol* n.d.:Wiley Online Library.
 32. Clodoveo ML. An overview of emerging techniques in virgin olive oil extraction process: strategies in the development of innovative plants. *J Agric Eng* 2013;44.
 33. Clodoveo ML, Durante V, La Notte D. Working towards the development of innovative ultrasound equipment for the extraction of virgin olive oil. *Ultrason Sonochem* 2013;20:1261–70.
 34. Amirante R, Clodoveo ML. Developments in the design and construction of continuous full-scale ultrasonic devices for the EVOO industry. *Eur J Lipid Sci Technol* 2017;119. doi:10.1002/ejlt.201600438.
 35. Amirante P, Clodoveo ML, Tamborrino A, Leone A, Paice AG. Influence of the crushing system: phenol content in virgin olive oil produced from whole and de-stoned pastes. *Olives Olive Oil Heal Dis Prev Acad Press London, UK* 2010:69–76.
 36. Dymond JH, Malhotra R. The Tait equation: 100 years on. *Int J Thermophys* 1988;9:941–51.
 37. Sauer J, Schnerr GH. Unsteady cavitating flow—a new cavitation model based on a modified front capturing method and bubble dynamics. *Proc. 2000 ASME fluid Eng. summer Conf.*, 2000, p. 11–5.
 38. Amirante R, Distaso E, Tamburrano P, Paduano A, Pettinicchio D, Clodoveo ML. Acoustic cavitation by means of ultrasounds in the extra virgin olive oil extraction process. *Energy Procedia*, vol. 126, 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.08.065.