

LA MECCANICA AGRARIA OGGI

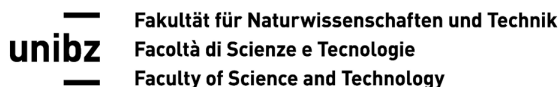
**UN CONFRONTO APERTO SU CONCETTI
IDEE E ASPETTATIVE DI UNA DISCIPLINA IN CONTINUA EVOLUZIONE**

a cura di Marco Bietresato e Fabrizio Mazzetto

Atti dell'omonimo convegno tenutosi
presso la libera Università di Bolzano e il NOI-Techpark
Bolzano, 23-24 novembre 2017

cleup

Pubblicazione realizzata con il contributo di



Curatori

- Marco BIETRESATO, Libera Università di Bolzano, Facoltà di Scienze e Tecnologie
- Fabrizio MAZZETTO, Libera Università di Bolzano, Facoltà di Scienze e Tecnologie

Comitato scientifico

- Paolo BALSARI, Università degli Studi di Torino, Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari
- Raffaele CAVALLI, Università degli Studi di Padova, Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali
- Giovanni Carlo DI RENZO, Università degli Studi della Basilicata, Scuola di Scienze Agrarie, Forestali, Alimentari ed Ambientali
- Andreas GRONAUER, Universität für Bodenkultur Wien, Department of Sustainable Agricultural Systems
- Fabrizio MAZZETTO, Libera Università di Bolzano, Facoltà di Scienze e Tecnologie
- Giovanni MOLARI, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari
- Danilo MONARCA, Università degli Studi della Tuscia, Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali
- Gianfranco PERGHER, Università degli Studi di Udine, Dipartimento di Scienze Agroalimentari, Ambientali e Animali
- Felice PIPITONE, Università degli Studi di Palermo, Dipartimento Scienze Agrarie e Forestali
- Giuseppe ZIMBALATTI, Università Mediterranea di Reggio Calabria, Dipartimento di Agraria

Comitato organizzativo

- Marco BIETRESATO, Libera Università di Bolzano, Facoltà di Scienze e Tecnologie
- Raimondo GALLO, Libera Università di Bolzano, Facoltà di Scienze e Tecnologie
- Fabrizio MAZZETTO, Libera Università di Bolzano, Facoltà di Scienze e Tecnologie

DOI: 10.23737/MECCANICA_AGRARIA_OGGI.HTML
https://doi.org/10.23737/MECCANICA_AGRARIA_OGGI.HTML

Prima edizione: luglio 2018

ISBN 978 88 6787 947 2

© 2018 CLEUP SC

“Coop. Libreria Editrice Università di Padova”
via G. Belzoni 118/3 – Padova (t. +39 049 8753496)
www.cleup.it
www.facebook.com/cleup

Tutti i diritti di traduzione, riproduzione e adattamento, totale o parziale, con qualsiasi mezzo (comprese le copie fotostatiche e i microfilm) sono riservati.

In copertina: disegno di Giovanna Bampa e Ian Carta, Ufficio Stampa ed Organizzazione Eventi, Libera Università di Bolzano.



Impianto innovativo per la surgelazione alimentare a temperature criogeniche

Alessandro BIGLIA¹, Lorenzo COMBA², Davide RICAUDA AIMONINO¹, Paolo GAY¹

¹ DiSAFA – Università degli Studi di Torino, Largo Paolo Braccini 2, 10095 Grugliasco (TO), Italia

² DENERG – Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italia

Sommario

Le problematiche di post-raccolta, post-processing e conservazione di prodotti agroalimentari sono da sempre oggetto di ricerca scientifica nell'ambito del settore della *Meccanica Agraria*. Nello specifico della fase di surgelazione e stoccaggio di prodotti alimentari congelati, la catena del freddo riveste un ruolo fondamentale dove vi è un forte interesse per l'individuazione di soluzioni tecniche all'avanguardia.

Il lavoro qui presentato propone la descrizione del ciclo termodinamico di un impianto innovativo per la surgelazione alimentare a temperature prossime ai -100 °C basato su in ciclo Brayton inverso. Impianti tradizionali per la surgelazione raffreddano l'aria, usata poi in comparti stagni o in tunnel di surgelazione, ad una temperatura prossima ai $-40/-30\text{ °C}$. La riduzione della temperatura dell'aria di surgelazione, a livelli molto più bassi rispetto a quelli tradizionali, permetterebbe sia di ridurre i tempi di surgelazione sia di contenere la dimensione dei cristalli di ghiaccio che si formano all'interno delle matrici alimentari.

L'indagine sperimentale qui illustrata è dunque finalizzata a presentare la configurazione impiantistica dell'impianto di surgelazione innovativo e le relative prestazioni energetiche. Un modello numerico del ciclo Brayton inverso è stato sviluppato in ambiente Matlab®. Il valore del coefficiente di prestazione, al fine di surgelare il prodotto ad una temperatura di circa -100 °C , risulta pari a 0,28.

Parole chiave: Industria alimentare; surgelazione; ciclo Brayton inverso; performance energetiche.

1. Introduzione

I processi di deterioramento dei prodotti alimentari iniziano appena dopo la raccolta e continuano fino al loro consumo. Il deterioramento è dovuto principalmente a batteri ed enzimi che causano perdita di consistenza e alterazioni del gusto e del colore. La surgelazione è una valida tecnica per la conservazione degli alimenti e/o prodotti trasformati che permette di estendere la shelf life e ridurre gli sprechi. La temperatura raccomandata per la conservazione di prodotti congelati è di $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ al cuore del prodotto (Biglia et al., 2016).

L'acqua contenuta nei prodotti alimentari è in parte legata chimicamente ad altri elementi ed in parte libera e contenuta all'interno delle cellule. Quest'ultima, durante la fase di surgelazione, congela ed espande causando stress meccanico sulle pareti cellulari. Una fase di surgelazione troppo lenta comporta la formazione di macrocristalli di ghiaccio causando così la rottura delle pareti cellulari. Una conseguenza di questo fenomeno è la perdita di consistenza del prodotto dopo lo scongelamento. La rottura delle pareti cellulari può essere controllata surgelando il prodotto alimentare nel più breve tempo possibile.

Il tempo di surgelazione di un alimento è definito come il tempo necessario per ridurre la temperatura iniziale del prodotto (circa $2/4\text{ }^{\circ}\text{C}$) fino a valori minori o uguali a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ al cuore del prodotto stesso. Il tempo di surgelazione dipende da: 1) tipologia di prodotto, 2) tipologia di fluido termovettore (liquido o gassoso) utilizzato per surgelare il prodotto e 3) temperatura e velocità del fluido termovettore (Pham, 2014).

Impianti di surgelazione nell'industria alimentare impiegano sistemi basati su macchine frigorifere a compressione di vapore per raffreddare aria anidra, utilizzata come fluido termovettore, ad una temperatura compresa tra i $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ e i $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'aria fredda viene solitamente impiegata per surgelare i prodotti alimentari in celle frigorifere (ciclo batch) o in tunnel (ciclo continuo) ad una velocità compresa tra i 2 e i $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Questa tipologia di impianto prende il nome di *air blast freezer* (Dempsey and Bansal, 2012). La velocità dell'aria, nel caso di alcune tipologie di prodotto quali piselli, filettini di pesce, fettine di carne, etc. può essere aumentata anche a valori prossimi a $50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tale tecnologia è nota come *impingement* (Salvadori and Mascheroni, 2002); l'aumento della velocità dell'aria permette di incrementare lo scambio termico tra aria e prodotto alimentare riducendo il tempo di surgelazione.

Il lavoro di ricerca qui illustrato è finalizzato a presentare un impianto di surgelazione innovativo basato su un ciclo Brayton inverso, che trasforma energia elettrica in energia frigorifera a bassa temperatura, accoppiato ad una cella di surgelazione (ciclo batch). Il ciclo Brayton inverso è a ciclo chiuso e raffredda aria anidra ad una temperatura di circa $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'aria anidra a $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ viene fatta circolare all'interno di uno scambiatore di calore installato nella cella di surgelazione. L'aria di cella o aria secondaria viene quindi raffreddata e movimentata per surgelare il prodotto. Rispetto ad esempi di letteratura (Foster et al., 2011), l'impianto qui proposto presenta soluzioni impiantistiche ottimizzate e livelli termodinamici di lavoro innovativi (Biglia et al., 2017a).

2. Materiale e metodi

L'impianto di surgelazione innovativo è composto da due circuiti separati: 1) un circuito chiuso basato su un ciclo Brayton inverso che raffredda aria anidra (gas refrigerante del circuito) a temperature prossime ai $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, e 2) una cella di surgelazione dove il prodotto alimentare viene surgelato con cicli batch utilizzando aria secondaria ad una temperatura prossima ai $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e ad una velocità di circa $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Uno scambiatore di calore, installato nella cella di surgelazione, collega i due circuiti (Figura 1).

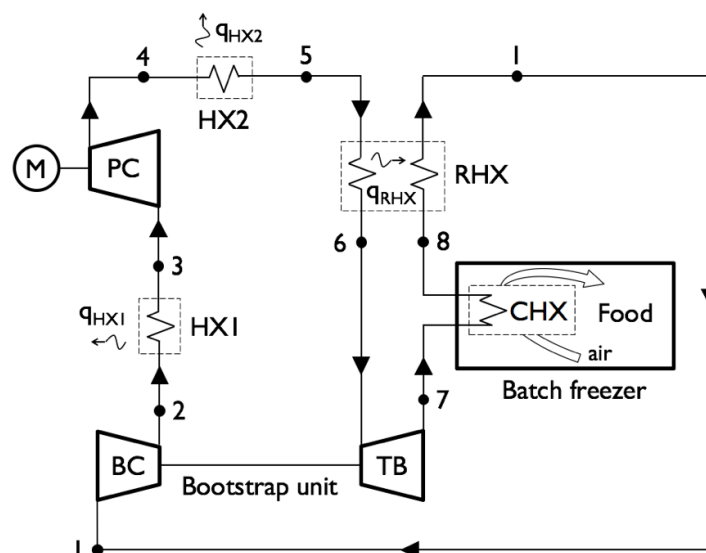


Figura 1 – Schema dell'impianto di surgelazione.

Il gas refrigerante del ciclo Brayton inverso (aria anidra) entra nel compressore di bassa pressione (BC) allo stato termodinamico 1 e viene compresso fino allo stato 2 aumentandone la pressione e la temperatura. La pressione nello stato 2 è circa il 20% maggiore dello stato 1. Il gas refrigerante prima di entrare nel compressore di alta pressione (PC), azionato da un motore elettrico (M), viene raffreddato nell'intercooler (HX1) utilizzando acqua tecnica o aria esterna. All'uscita del compressore PC il gas refrigerante si trova nelle condizioni di pressione massima (circa 29 barg) e di temperatura massima (circa $115\text{ }^{\circ}\text{C}$). Il gas refrigerante prima di espandere in turbina (TB) viene raffreddato nel secondo intercooler (HX2) e nel rigeneratore (RHX). Lo scambiatore HX2 è raffreddato da acqua tecnica o aria esterna mentre il rigeneratore RHX recupera energia a bassa temperatura dal gas refrigerante all'uscita dello scambiatore di cella (CHX). Il gas refrigerante si espande in turbina TB passando dallo stato 6 allo stato 7 che rappresenta il punto di temperatura minima del ciclo Brayton inverso (circa $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$). Il lavoro generato dalla turbina TB durante l'espansione viene utilizzato per trascinare il compressore di bassa pressione BC. Il gas refrigerante viene poi utilizzato nello scambiatore di cella CHX per raffreddare l'aria secondaria di cella utilizzata per surgelare il prodotto alimentare. All'uscita dello scambiatore di cella, il gas refrigerante ancora a temperature basse, viene utilizzato nello scambiatore rigenerativo RHX. Il ciclo termodinamico si chiude riprendendo il ciclo nel punto iniziale 1 (punto di pressione minima dell'impianto, circa 13 barg).

Il coefficiente di prestazione (CoP) del ciclo Brayton inverso può essere definito come

$$\text{CoP} = \frac{h_8(T_8, p_8) - h_7(T_7, p_7)}{(h_4(T_4, p_4) - h_3(T_3, p_3))\eta^{-1}} \quad (1)$$

rapporto della differenza di entalpia nello scambiatore CHX (effetto utile) e nel compressore di alta pressione PC (spesa). La definizione del CoP dell'Equazione 1 tiene in considerazione anche il rendimento (η) del motore elettrico.

Un modello numerico del ciclo Brayton inverso è stato sviluppato per valutarne le prestazioni energetiche. Ogni componente del ciclo termodinamico di Figura 1 è stato modellato utilizzando il primo principio della termodinamica in condizioni stazionarie e adiabatiche. Il modello numerico è stato implementato in ambiente Matlab® e le proprietà termodinamiche del gas refrigerante valutate con REFPROP.

3. Risultati e discussione

I risultati della simulazione numerica sono stati riportati in Figura 2.

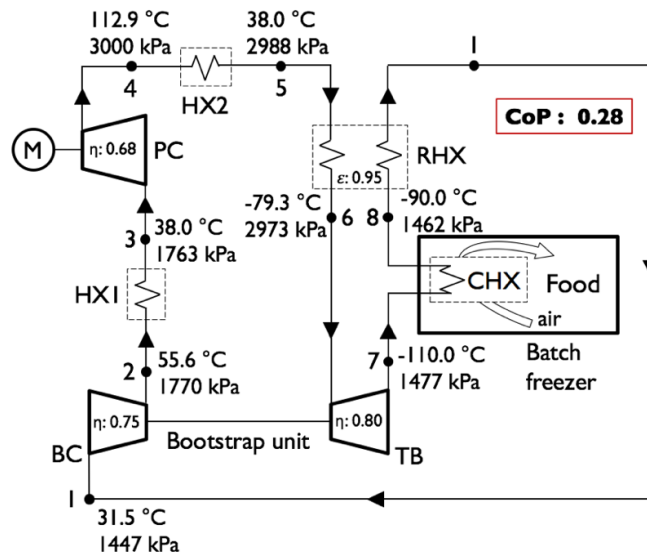


Figura 2 – Parametri termodinamici di funzionamento del ciclo Brayton inverso.

Un aspetto significativo del ciclo oggetto di studio sono i livelli termici raggiunti dal gas refrigerante all'interno del ciclo Brayton inverso. Il gas refrigerante copre infatti un intervallo molto ampio di temperature, da un minimo di -110 °C ad un massimo di circa 115 °C. L'energia termica all'uscita dei due compressori può essere quindi recuperata a bassa temperatura e utilizzata in diversi processi alimentari (Biglia et al., 2017b; Biglia et al., 2015). Tale aspetto rappresenta un valore aggiunto per questa tipologia di impianto di surgelazione rispetto ad impianti di surgelazione tradizionali. Il coefficiente di performance CoP ottenuto è pari a 0,28, il quale implica una potenza del motore elettrico pari a 3,6 kW per ogni kW di potenza di surgelazione richiesto a circa -100 °C.

Il valore del coefficiente di performance CoP è stato inoltre valutato in funzione della pressione massima del ciclo e della differenza di temperatura del gas refrigerante nello scambiatore CHX (Figura 3a) e in funzione dell'efficienza del rigeneratore e dell'efficienza isentropica della turbina (Figura 3b).

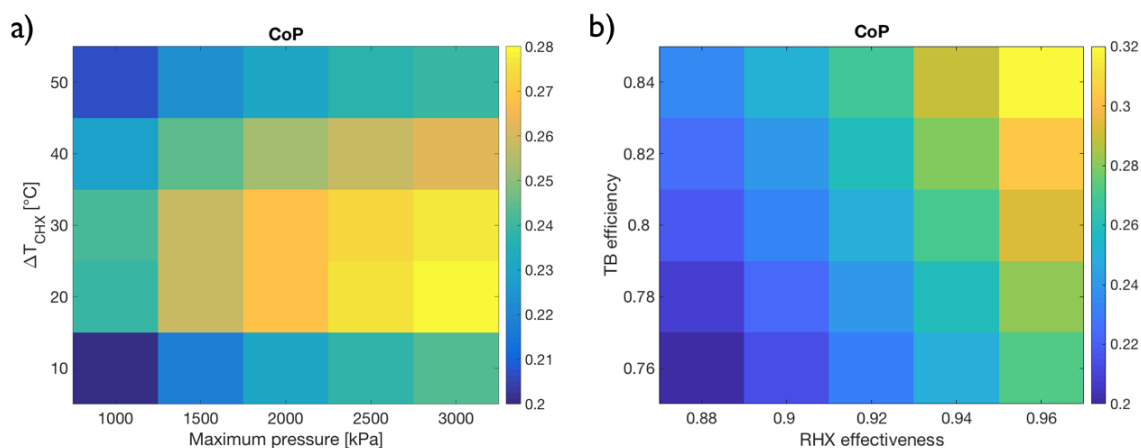


Figura 3 – Analisi parametrica delle performance energetiche del ciclo Brayton inverso.

Fissata la capacità di surgelazione dell'impianto (kW dello scambiatore in cella CHX), la differenza di temperatura del gas refrigerante tra ingresso e uscita dello scambiatore CHX influenza la portata di gas refrigerante circolante nell'impianto e conseguentemente la potenza di tutti i componenti dell'impianto.

La pressione massima del gas refrigerante e l'efficienza isentropica della turbina, fissata la temperatura (T_7) all'uscita della turbina, influenzano il rapporto di espansione di turbina. Un maggiore rapporto di espansione richiede in seguito un maggiore lavoro del compressore di alta pressione, e di conseguenza del motore elettrico, per bilanciare la riduzione di pressione in turbina.

L'efficienza del rigeneratore RHX influenza la temperatura del gas refrigerante all'ingresso della turbina. Riducendo la temperatura del gas refrigerante all'ingresso della turbina il rapporto di espansione in turbina si riduce e di conseguenza il salto di pressione richiesto nel compressore di alta pressione si riduce.

4. Conclusioni

Un impianto innovativo, basato su un ciclo Brayton inverso, per la surgelazione di prodotti alimentari è stato analizzato e studiato attraverso l'utilizzo di simulazioni numeriche in ambiente Matlab®. Il ciclo Brayton inverso è in grado di trasformare energia elettrica in energia frigorifera a temperature prossime ai -100 °C garantendo così tempi di surgelazione molto rapidi. Il ciclo Brayton inverso permette inoltre di recuperare energia termica ad una temperatura compresa tra i 60 °C e i 120 °C che può essere utilizzata direttamente all'interno del processo produttivo oppure per il riscaldamento di acqua per il lavaggio degli impianti.

Il coefficiente di performance CoP ottenuto dalla simulazione numerica risulta pari a 0,28. Considerando un costo dell'energia elettrica pari a 0,18 € per kWh il costo di funzionamento dell'impianto, manutenzione esclusa, risulta essere pari a 64 c€ per kWh elettrico consumato.

Lo studio qui proposto mostra come la Meccanica Agraria rivesta un ruolo multidisciplinare e innovativo in riferimento a problematiche molto importanti quali la catena del freddo e la surgelazione alimentare. Il ruolo del Meccanico Agrario è quindi fondamentale per svolgere attività di coordinamento e ricerca sul campo, identificare reali esigenze degli utenti finali, innovare e diffondere nuove soluzioni.

Bibliografia

- Biglia, A., Fabrizio, E., Ferrara, M., Gay, P., Ricauda Aimonino, D. (2015). Performance assessment of a multi-energy system for a food industry. *Energy Procedia*, 82, 540-545.
- Biglia, A., Comba, L., Fabrizio, E., Gay, P., Ricauda Aimonino, D. (2016). Case studies in food freezing at very low temperature. *Energy Procedia*, 101, 305-312.
- Biglia, A., Comba, L., Fabrizio, E., Gay, P., Mannini, A., Mussinatto, A., Ricauda Aimonino, D. (2017a). Reversed Brayton cycle for food freezing at very low temperatures: Energy performance and optimisation. *Int J Refrig*, 81, 82-95.
- Biglia, A., Comba, L., Fabrizio, E., Gay, P., Ricauda Aimonino, D. (2017b). Steam batch thermal processes in unsteady state conditions: Modelling and application to a case study in the food industry. *Appl Therm Eng*, 118, 638-651.
- Dempsey, P., Bansal, P. (2012). The art of air blast freezing: Design and efficiency considerations. *Appl Therm Eng*, 47, 71-83.
- Foster, A.M., Brown, T., Gigiel, A.J., Alford, A., Evans, J.A. (2011). Air cycle combined heating and cooling for the food industry. *Int J Refrig*, 34, 1296-1304.
- Pham, Q.T. (2014). Freezing time formulas for foods with low moisture content, low freezing point and for cryogenic freezing. *J Food Eng*, 127, 85-92.
- Salvadori, V.O., Mascheroni, R.H. (2002). Analysis of impingement freezers performance. *J Food Eng*, 54, 133-140.

Stampato nel mese di luglio 2018

presso C.L.E.U.P. "Coop. Libreria Editrice Università di Padova"

via G. Belzoni 118/3 - 35121 Padova (t. +39 049 8753496)

www.cleup.it - www.facebook.com/cleup