

L'Innovazione della Cavitazione Idrodinamica nella Birrificazione: Efficienza, Qualità e il Ruolo Centrale del CDR BeerLab®

Dr. Francesca Bruni ricercatrice del CDR Chemical Lab "Francesco Bonicolini"

P2604

1. Introduzione: Il Cambio di Paradigma nella Produzione Brassicola

La moderna industria brassicola sta vivendo una transizione fondamentale, evolvendo da una prassi consolidata dalla tradizione verso una frontiera di ingegneria di processo ad alta precisione. La sfida per i produttori contemporanei è duplice: abbattere l'impronta energetica dei processi e massimizzare la ritenzione di composti bioattivi termosensibili, preservando l'integrità organolettica del prodotto finale.

In questo scenario, la cavitazione idrodinamica (HC) si è affermata come il "game changer" tecnologico. Non si tratta di un'ottimizzazione incrementale, ma di un cambio di paradigma capace di integrare e sostituire fasi critiche come l'ammontamento e la bollitura, operando su scale micro- e nanometriche. Tuttavia, l'adozione industriale di tali tecnologie richiede una validazione analitica rigorosa. Il sistema **CDR BeerLab®** rappresenta in questo senso un punto fondamentale per il controllo di processo, fornendo i dati necessari per tradurre la fluidodinamica complessa in eccellenza operativa certificata e qualità desiderata del prodotto finito.

2. Fondamenti Tecnologici della Cavitazione Idrodinamica (HC)

La cavitazione idrodinamica è un fenomeno fisico caratterizzato dalla formazione, crescita e successiva implosione di bolle di vapore in un liquido, innescate da una caduta della pressione locale al di sotto della tensione di vapore. Nel collasso delle bolle si liberano energie meccaniche localizzate (onde d'urto e micro-getti) e temperature puntuali estreme, pur mantenendo moderata la temperatura di bulk.

Per il trattamento di mosti ad alta viscosità con carichi di solidi sospesi, il reattore a **tubo di Venturi** si è dimostrato ingegneristicamente superiore rispetto alle piastre a orifizio, garantendo stabilità fluidodinamica e riducendo drasticamente il rischio di fouling o ostruzioni. Il controllo dell'intensità del processo è regolato dal **Numero di Cavitazione (σ)**, definito dal rapporto tra le pressioni statiche e dinamiche. Dati sperimentali avanzati confermano che l'efficienza di letalità del lievito non è lineare, ma presenta due massimi locali critici a $\sigma = 0.3$ e $\sigma = 1.7$, parametri fondamentali per il tuning fine del reattore.

Dal punto di vista termodinamico, la HC offre vantaggi unici:

- **Riscaldamento Semi-Adiabatico:** L'energia meccanica fornita dalla pompa viene convertita direttamente in calore per attrito interno volumetrico, eliminando la necessità di superfici di scambio termico ad alta temperatura.
- **Assenza di Gradienti Termici:** Il riscaldamento uniforme del volume di fluido previene la

formazione di "punti caldi", eliminando i rischi di caramellizzazione degli zuccheri e preservando la stabilità del colore (EBC).

- **Efficienza Cinetica:** La disintegrazione cellulare e l'estrazione degli amidi avvengono per via meccanica, accelerando drasticamente la cinetica enzimatica.

3. Analisi Operativa: Efficienza Energetica e Potenzimento Estrattivo

Nell'ambito del **progetto T.I.L.A. (Tecnologia Innovativa per Liquidi Alimentari)** è stata esplorata la tecnologia della cavitazione al servizio della produzione brassicola al fine di ridurre i tempi di lavoro e i consumi energetici. Le evidenze sperimentali raccolte durante le prove mostrano un divario netto tra il processo tradizionale (TR) e quello assistito dalla cavitazione (HC). La tecnologia HC semplifica l'architettura dell'impianto, eliminando la triturazione a secco e riducendo drasticamente i tempi di bollitura.

Parametro Operativo	Processo Tradizionale (TR)	Processo HC (CAVIBEER)	Meccanismo Fisico Dominante
Consumo Energetico (Ciclo)	Riferimento 100%	Riduzione > 30-40%	Eliminazione bollitura e riduzione perdite termiche
Inattivazione Yeast (Energia)	Riferimento 100%	Riduzione ~ 20%	Sinergia tra stress meccanico e termico
Tempi di Lavorazione	Ciclo Standard	Riduzione > 50%	Accelerazione mass transfer e saccarificazione
Efficienza Estrazione Amido	Standard	Incremento del 30%	Disintegrazione meccanica dei grani
Temperatura Saccarificazione	~ 68-70°C	**~ 33-35°C**	Riduzione del gradiente di ~ 35°C per via meccanica

La riduzione della temperatura di saccarificazione a circa **33-35°C** non è solo un risparmio termico, ma una trasformazione della cinetica di processo che minimizza lo stress ossidativo sui precursori aromatici.

4. Eccellenza Qualitativa e Profili Bioattivi

La cavitazione idrodinamica migliora tantissimo la qualità nutrizionale della birra. Invece di distruggere o far perdere i composti preziosi del luppolo, come succede nella produzione tradizionale con il bollore forte e prolungato, questo metodo li protegge e ne aumenta addirittura la presenza nel prodotto finale. Ecco i vantaggi principali:

- **Xantoumolo (XN) e DMX (desmetilxantoumolo):** Questi sono due flavonoidi prenilati super-importanti del luppolo, noti per le loro proprietà antiossidanti, antinfiammatorie e potenzialmente protettive contro

alcune malattie. Nella bollitura classica, lo xantoumolo si trasforma quasi tutto in una forma meno attiva (isoxantoumolo). Con la cavitazione idrodinamica (HC), questa trasformazione è molto ridotta.

In un campione testato durante le prove del progetto la quantità di DMX è addirittura aumentata del 136% rispetto a quella iniziale: praticamente il processo ha protetto al 100% questi composti preziosi.

● **6-Geranylnaringenina (6-GN):**

È un altro composto raro e molto bioattivo del luppolo, che porta effetti antiossidanti e altri benefici. La cavitazione favorisce tantissimo la sua formazione a partire da precursori presenti nel luppolo.

Nello stesso campione ad elevata concentrazione di DMX, si sono raggiunti 55 µg/L, un livello altissimo che supera quello tipico delle birre Ale chiare e si avvicina a quello delle birre scure (Dark beer) normalmente più ricche di questo composto. La conversione è stata del 20,9%, mentre nel metodo tradizionale è praticamente zero.

● **Pastorizzazione delicata per proteggere gli aromi:**

Per rendere la birra stabile e sicura, eliminando i lieviti residui come il *Saccharomyces cerevisiae*, di solito serve scaldare a temperature alte (tipo 62-63 °C). Con la cavitazione, basta arrivare a solo 52 °C per inattivare il 90% del lievito.

È una sorta di "pastorizzazione fredda": gli aromi delicati e volatili del luppolo come quelli freschi, erbacei, agrumati, si conservano molto meglio, perché non vengono "cotti" dal calore eccessivo.

● **Riduzione del glutine per ottenere birre "gluten-reduced" o gluten-free con cereali tradizionali:**

La prolina è la parte più "ostinata" del glutine, quella che resiste di più alla digestione e crea problemi a chi è sensibile.

Applicando regimi specifici di cavitazione durante la bollitura e la fermentazione, si riesce a degradare questa prolina in modo naturale, senza enzimi aggiunti o cambi radicali di ricetta.

Risultato: si possono produrre birre con contenuto di glutine molto basso o addirittura "gluten-free" secondo le norme usando orzo o frumento normali, mantenendo il gusto e lo stile tradizionale.

In poche parole: questa tecnologia non solo risparmia energia e rende il processo più efficiente, ma produce una birra più ricca di composti salutari del luppolo, più aromatica, più stabile e potenzialmente adatta anche a chi tollera poco il glutine. È un passo avanti importante per birre di alta qualità e più "funzionali".

5. Il Ruolo del CDR BeerLab®: Ottimizzazione e Validazione Scientifica

Nelle sperimentazioni CNR, il CDR BeerLab® non è stato un semplice strumento di monitoraggio, ma il dispositivo principale per validare i modelli matematici di letalità del lievito (FT termica e FC cavitazionale). La precisione fotometrica ha permesso di calibrare questi modelli in modo rigoroso, quantificando la riduzione della vitalità cellulare in base ai regimi di cavitazione applicati. Senza questa accuratezza, l'ottimizzazione dei parametri fluidodinamici resterebbe teorica.

Immediate Process Tuning: Cosa permette di fare in pratica CDR BeerLab®

Grazie alle analisi rapide e precise, si è possibile regolare il processo in tempo reale:

- **Monitoraggio IBU e XN:** regola la valvola di pressione per ottimizzare il numero di cavitazione σ in base all'estrazione del luppolo.
- **Analisi degli zuccheri:** indica la vitalità residua del lievito, validando i modelli di letalità sul momento (più zuccheri residui = meno lievito vivo).
- **Determinazione di stabilità colore e alcol:** verifica assenza di ossidazione e regolarità della fermentazione dopo cavitazione.

La precisione del CDR BeerLab® ha permesso di correlare dati reali alla letalità, identificando sperimentalmente i picchi di massima efficienza a $\sigma = 0.3$ e $\sigma = 1.7$.

Grazie a queste misurazioni fotometriche continue, i ricercatori hanno confermato e ottimizzato il processo in modo concreto e affidabile.

6. Conclusioni: Verso il Birrificio 4.0

L'integrazione della tecnologia "CAVIBEER" e della precisione analitica del **CDR BeerLab®** traccia la rotta per la birrificazione industriale del futuro. I risultati sono inequivocabili: risparmi energetici superiori al 30%, dimezzamento dei tempi di ciclo e un profilo bioattivo potenziato.

La sinergia tra l'ingegneria dei fluidi avanzata e il controllo qualità rigoroso costituisce il pilastro per una produzione sostenibile, sana e tecnicamente superiore. La transizione verso una birreria 4.0 passa necessariamente per questa unione tra innovazione meccanica e certezza analitica.