Jan Iciek

Instytut Chemicznej
Technologii Żywności
Politechnika Łódzka

Korzyści i uwarunkowania stosowania ciągłej sterylizacji termicznej podłoży

1. Wprowadzenie

Sterylizacja podłoża i zachowanie uzyskanej jałowości są niezbędne dla prawidłowego przeprowadzania wielu procesów technologicznych, a sterylizacja produktów umożliwia ich przechowywanie i stosowanie zgodnie z przeznaczeniem. Efekt sterylizacji można uzyskać różnymi sposobami, stosując metody fizyczne, chemiczne i mechaniczne (1). W przemyśle najczęściej jest stosowana metoda termiczna, którą można realizować z wykorzystaniem różnych form wymiany ciepła i w wielu typach aparatów (1–7).

Sterylizację termiczną można prowadzić w sposób ciągły lub okresowy. Do wyjaławiania płynów bez opakowań w polskim przemyśle stosowana jest praktycznie jedynie metoda okresowa. Realizowana jest ona bezpośrednio w fermentatorze, gdzie jednocześnie są sterylizowane podłoże oraz fermentor.

W cyklu technologicznym procesu sterylizacji okresowej można wyróżnić następujące etapy: a) napełnianie fermentora pożywką niejałową, b) ogrzewanie pożywki i fermentora do temperatury około 121°C, c) przetrzymywanie w tej temperaturze przez czas niezbędny do zabicia przetrwalników (najczęściej około 30 minut), d) chłodzenie całości do temperatury wymaganej w prowadzonym następnie procesie fermentacyjnym. Taki sposób sterylizacji zapewnia uzyskanie jałowego podłoża, bez konieczności jego wcześniejszego przygotowania (np. homogenizacji w przypadku zawiesin) oraz przy zastosowaniu stosunkowo prostych aparatów i ich minimalnego oprzyrządowania. Jednakże (obecnie) stosowanie tej metody jest bardzo kosztowne i może powodować nieopłacalność produkcji. Z tych powodów w krajach rozwiniętych metoda okresowa od dawna jest zastąpiona metodą ciągłą (3,4). Zastosowanie ciągłej sterylizacji termicznej w porównaniu do okresowej pozwala na:

1) efektywniejsze wykorzystanie surowców (dzięki mniejszemu ich uszkodzeniu w wyniku termicznej obróbki),

2) zwiększenie zdolności produkcyjnej instalacji (krótszy okres sterylizacji, a także czas cyklu technologicznego),

3) około czterokrotne zmniejszenie zużycia energii cieplnej i wody chłodzącej,

4) możliwość stosowania fermentorów (bioreaktorów) ciągłych.

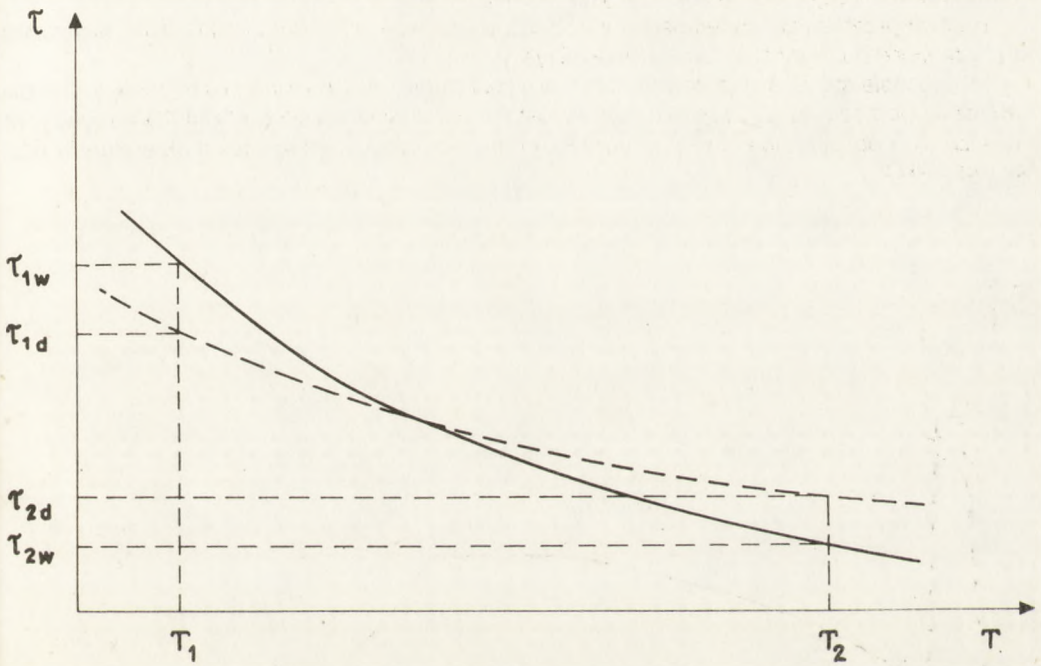
Należy podkreślić, że uzyskanie ww. efektów jest możliwe przy zastosowaniu nowoczesnych rozwiązań aparaturowych i prawidłowej organizacji produkcji. Wymaga zatem świadomego współuczestnictwa wszystkich pracowników zakładu we wdrażaniu sterylizacji ciągłej. Obecnie w Polsce zlekceważenie tych faktów może być powodem nierentowności produkcji wielu zakładów przemysłowych.

Celem artykułu jest wyjaśnienie zasady oraz potrzeb i możliwości wdrożenia do polskiego przemysłu ciągłej sterylizacji termicznej podłoży dla procesów biotechnologicznych.

2. Zasada sterylizacji termicznej

Bez względu na sposób (okresowy lub ciągły) zasada sterylizacji termicznej jest jednak i polega na przetrzymaniu podłoża lub produktu w podwyższonej temperaturze (w praktyce powyżej 121°C) przez określony czas. Wiadomo, że czas sterylizacji τ_s (czas wymagany do zabicia przetrwalników) zależy głównie od temperatury (8) oraz szeregu innych parametrów (9,10,11), z których do najważniejszych można zaliczyć: rodzaj oraz stan fizjologiczny i stężenie drobnoustrojów, pH środowiska, kinetykę ogrzewania (czas i sposób ogrzewania podłoża od temperatury początkowej do temperatury sterylizacji), kinetykę chłodzenia i inne.

Wpływ temperatury na wymagany czas sterylizacji jest bardzo wyraźny; zawsze maleje ze wzrostem temperatury sterylizacji. Jednakże obróbka termiczna wpływa zarówno na niszczenie drobnoustrojów jak i właściwości podłoża. Ten wpływ dla większości znanych w praktyce przypadków jest zgodny z tendencjami, które schematycznie pokazano na rys.1.



Rys.1. Wpływ warunków obróbki termicznej na: zabijanie drobnoustrojów ——, zmiany (obniżenie jakości) podłoża – – – –.

Konkretny przebieg obu linii uzależniony jest od szeregu parametrów (13), ale ogólnie można wyróżnić dwa zakresy.

Pierwszy obejmuje niskie wartości temperatury (wg autora poniżej 125° C; np. T_1 na rys.1). W tym zakresie wymagane jest zastosowanie długiego czasu dla przeprowadzenia skutecznej sterylizacji podłoża, co powoduje obniżenie jego jakości w wyniku zbyt długiej (dłuższej niż dopuszczalna) obróbki termicznej (na rys.1 $\tau_{1w} > \tau_{1d}$), gdzie: τ_{1w} – minimalny (wymagany) czas sterylizacji w temperaturze T_1, τ_{1d} – maksymalny (dopuszczalny) czas przetrzymania podłoża w temperaturze T_1, który jeszcze nie powoduje zmiany właściwości podłoża.

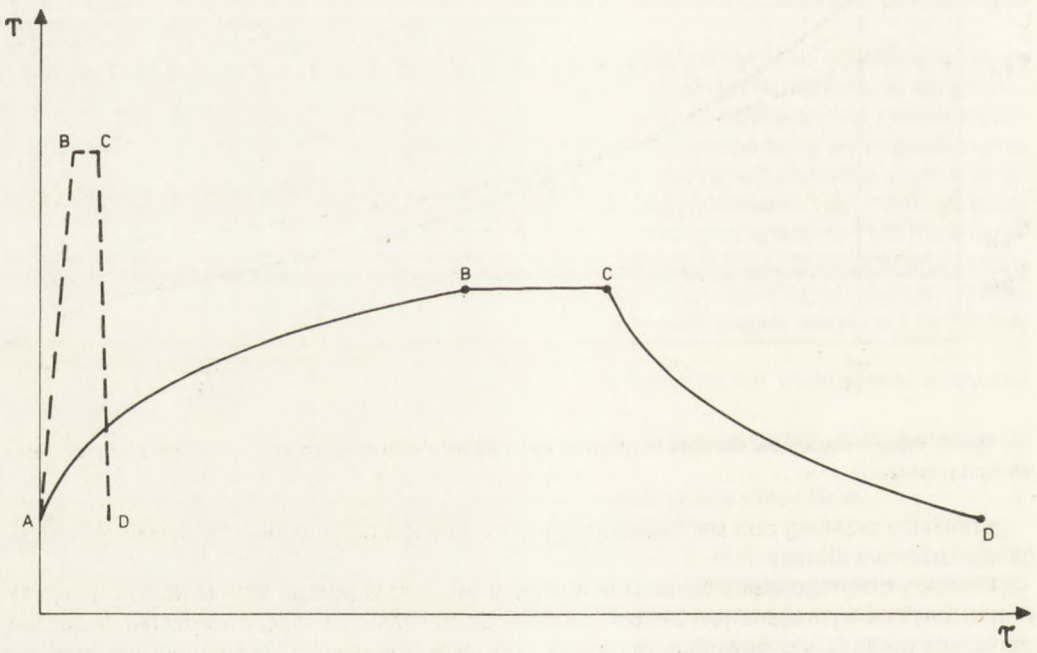
Drugi zakres obejmuje wysokie wartości temperatury (w autora powyżej 125° C; np. T_2 na rys.1). W tym zakresie można przeprowadzić skuteczną sterylizację przy zachowaniu pierwotnych właściwości podłoża, bo wymagany do przeprowadzenia skutecznej sterylizacji czas τ_{2w} jest krótszy od dopuszczalnego τ_{2d}, wynikającego z odporności podłoża na obróbkę termiczną.

W praktyce dla uzyskania pewności efektu sterylizacji termicznej należy stosować czas dłuższy od minimalnego, czyli $\tau_s > \tau_w$, co na rys. 1 oznacza obszar ponad linią ciągłą. Takie zabezpieczenie gwarantuje jałowość podłoża, ale powoduje znaczne obniżenie jego jakości przy sterylizacji w temperaturze poniżej 125°C. Stosując wysoką temperaturę sterylizacji powyżej 125°C) można, dla większości przypadków znanych w praktyce, zastosować czas gwarantujący zabicie przetrwalników i nie powodujący uszkodzenia podłoża (np. T_2 na rys. 1). Taki czas można i należy określić jako optymalny: $\tau_w < (\tau_s)_{opt.} < \tau_d$.

Przystępując do opracowania warunków sterylizacji termicznej należy poznać, dla potrzeb konkretnej technologii, zarówno możliwości termicznego niszczenia drobnoustrojów jak i odporność podłoża na obróbkę termiczną. Takie rozeznanie pozwoli na optymalny wybór metody i warunków realizacji procesu sterylizacji termicznej.

Typowy przebieg zmian temperatury podłoża w procesie jego okresowej i ciągłej sterylizacji termicznej przedstawiono schematycznie na rys. 2.

W procesie sterylizacji (zarówno okresowej jak i ciągłej) można wyróżnić trzy etapy obróbki termicznej podłoża: a) ogrzewanie, czyli wzrost temperatury w czasie (odcinki AB na rys.2), b) sterylizacja w stałej temperaturze (odcinki BC) i c) chłodzenie, czyli spadek temperatury w czasie (odcinki CD).



Rys.2. Typowy przebieg zmian temperatury podłoża w procesie jego sterylizacji termicznej: okresowej ———, ciągłej – – – –.

Analiza rys. 2 pozwala podkreślić różnice, a przede wszystkim korzyści wynikające ze stosowania sterylizacji ciągłej w stosunku do okresowej. Podstawowa różnica dotyczy możliwości kinetycznych wymiany ciepła i wynikających stąd, stosowanych w praktyce, wartości temperatury oraz czasu obróbki termicznej podłoży. W procesie sterylizacji ciągłej czas ten wynosi od kilkunastu sekund do kilku minut, podczas gdy dla sterylizacji okresowej od kilku do kilkunastu godzin. Różnice te są konsekwencją zastosowanych w poszczególnych rozwiązaniach aparatów i przebiegających w nich procesów.

Podczas sterylizacji okresowej ogrzewanie i chłodzenie podłoża w zbiorniku są realizowane jako procesy typowe dla nieustalonego ruchu ciepła. Początkowo strumienie ciepła oraz przyrosty (lub spadki dla chłodzenia) temperatury są znaczne i stopniowo asymptotycznie maleją, co obrazuje linia ciągła na rys. 2. Podczas sterylizacji ciągłej procesy ogrzewania i chłodzenia (ich kinetykę obrazuje linia przerywana na rys. 2) przebiegają bardzo szybko (w wymiennikach przeponowych lub bezprzeponowych).

Drugą istotną różnicą między sterylizacją okresową i ciągłą jest temperatura tego procesu. Realizując sposób okresowy stosuje się niską temperaturę sterylizacji (zwykle około 121°C) zarówno ze względu na długi czas termicznej obróbki podłoża jak i zminimalizowanie zużycia energii cieplnej oraz wody chłodzącej (praktycznie brak jest tu możliwości odzysku ciepła). Wady sterylizacji okresowej nie występują podczas sterylizacji ciągłej, w której stosuje się zwykle wysoką temperaturę (najczęściej powyżej 130°C).

3. Zasada ciągłej sterylizacji termicznej podłoży

Ciągła sterylizacja termiczna płynów jest prowadzona w przepływie, tzn. podgrzany do wymaganej temperatury sterylizacji płyn przepływa przez izolowany przetrzymywacz (najczęściej rurociąg). Czas sterylizacji można łatwo i dokładnie regulować poprzez zmianę objętości (długości i średnicy) przetrzymywacza oraz natężenia przepływu podłoża.

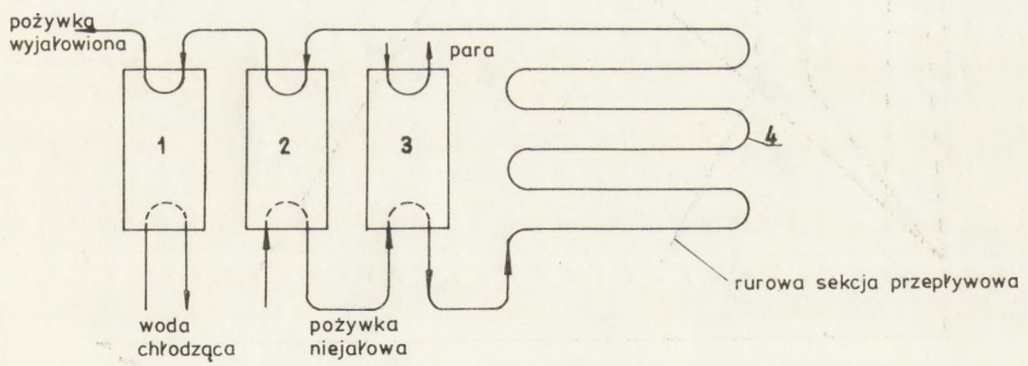
Realizacja sterylizacji termicznej podłoży w przepływie wymaga zastosowania wymienników ciepła, dzięki czemu można:

1) odzyskać znaczną część energii cieplnej,

2) uzyskać jednakowe warunki obróbki termicznej podłoża,

3) uzyskać wysoką intensywność wymiany ciepła, co pozwala na znaczne skrócenie czasu obróbki termicznej podłoża,

4) regulować łatwo i z dużą precyzją czas sterylizacji,



Rys.3. Schemat blokowy instalacji do ciągłej sterylizacji termicznej cieczy z zastosowaniem przeponowych wymienników ciepła.

5) przeprowadzić proces w warunkach zapewniających uzyskanie wysokiej jakości sterylnego podłoża i przy niskich kosztach eksploatacyjnych.

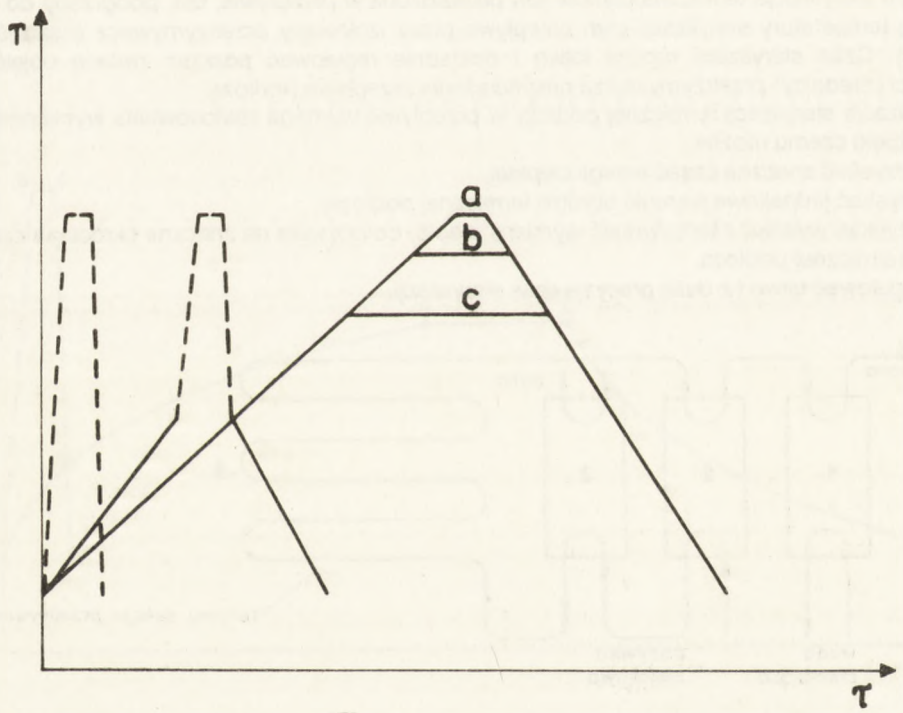
Zasadę ciągłej sterylizacji można najłatwiej wyjaśnić omawiając klasyczny schemat blokowy, z zastosowaniem przeponowych wymienników ciepła, przedstawiony na rys. 3.

Niejałowa pożywka jest ogrzewana wstępnie (pożywką jałową) w przeciwprądowym wymienniku ciepła 2, a następnie dogrzewana parą do zadanej temperatury sterylizacji w wymienniku ciepła 3. Właściwy proces sterylizacji termicznej pożywki następuje podczas jej przepływu przez przetrzymywacz rurowy 4. Następnie, sterylna pożywka schładzana jest kolejno w wymiennikach 2 i 1 odpowiednio niejałową pożywką i wodą. Proces ogrzewania i schładzania pożywki może być prowadzony w wielu aparatach i z zastosowaniem różnych sposobów wymiany ciepła.

4. Potrzeby i możliwości realizacji wymiany ciepła podczas ciągłej obróbki termicznej podłoży

Projektując aparaturę do konkretnego procesu technologicznego należy uwzględnić: właściwości mediów, wymagania technologii, możliwości procesowe oraz koszty budowy i eksploatacji poszczególnych aparatów, koszty energii oraz surowców itp. Podobną analizę należy wykonać projektując instalację do sterylizacji termicznej cieczy w przepływie.

Kilka przykładów różniących się sposobem ogrzewania i chłodzenia podłoża, a w efekcie odmiennych warunków jego obróbki termicznej podczas sterylizacji w przepływie, pokazano schematycznie na rys. 4.



Rys.4. Wpływ sposobu ogrzewania i chłodzenia podłoża na warunki jego obróbki termicznej podczas sterylizacji w przepływie: wymiana ciepła przeponowa ———, wymiana ciepła bezprzeponowa – – – –.

Linia przerywana ilustruje przykład błyskawicznej zmiany temperatury podłoża. Tak dużą szybkość ogrzewania (np. w czasie około 1 sekundy od 20°C do 140°C) można uzyskać stosując jeden ze sposobów bezprzeponowej wymiany ciepła, a mianowicie wtrysk (iniekcję) pary wodnej do przepływającego podłoża (8). Równie szybkie jego schłodzenie można uzyskać poprzez rozprężenie, a dzięki temu spowodować samoodparowanie i usunięcie wprowadzonej wcześniej pary wodnej. Taki sposób prowadzenia procesu ciągłej sterylizacji termicznej podłoża pozwala w znacznym stopniu zachować jego pierwotne właściwości, ale w tym przypadku zużycie energii i wody chłodzącej jest bardzo duże i dlatego w praktyce częściej stosuje się inne warunki obróbki termicznej podłoża.

Linia ciągła na rys. 4 ilustruje charakter zmiany temperatury podłoża podczas jego ogrzewania i schładzania w wymiennikach przeponowych. Dodatkowo literami (a), (b), (c) oznaczono różne możliwości zrealizowania sterylizacji termicznej (wysokość temperatury i czas jej oddziaływania). Należy podkreślić, że kinetyka wymiany ciepła, a więc szybkość ogrzewania i schładzania podłoża, zależy od typu wymiennika ciepła i stworzonych tam warunków hydrodynamicznych oraz cieplnych.

Zastosowanie wymienników przeponowych (tak jak na rys. 3) pozwala na odzysk nawet ponad 90% ciepła (12). Dla konkretnego układu wymienników oraz stałego natężenia przepływu podłoża o tym samym składzie można uzyskać różną kinetykę (szybkość) ogrzewania i schładzania poprzez zmianę stopnia odzysku ciepła. Ta zależność jest bardzo wyraźna i określona w ten sposób, że ze zwiększaniem stopnia odzysku ciepła będzie malała kinetyka wymiany ciepła, a więc będzie ulegał wydłużeniu czas obróbki termicznej podłoża.

Wymienniki przeponowe można stosować dla podłoży o dobrej i średniej odporności na obróbkę termiczną. Spośród znanych wymienników przeponowych, do ciągłej sterylizacji termicznej podłoży najczęściej wykorzystywane są dwa typy: płytowe i spiralne (7,12,14,15,16). Pierwsze zaleca się stosować do cieczy i roztworów czystych o niskiej lepkości (7,8,12,16). Dla zawiesin i roztworów o dużej lepkości zalecane są wymienniki spiralne (7,8,12).

Dla podłoży o małej odporności na obróbkę termiczną zalecane jest stosowanie dwustopniowej formy wymiany ciepła (linia łamana – początkowo ciągła potem przerywana na rys. 4). W przypadku niskich wartości temperatury stosuje się wymienniki przeponowe, a w zakresie temperatury wysokiej – bezprzeponowe. Ten sposób prowadzenia ciągłej sterylizacji termicznej pozwala na zachowanie lub minimalne zmiany pierwotnych właściwości podłoża, jednakże odzysk ciepła jest mniejszy (w praktyce 50 do 70%).

Do ogrzewania podłoża można również stosować drugą formę bezprzeponowej wymiany ciepła, polegającą na wtrysku cieczy do pary (infuzja) (17,18).

Dobór warunków sterylizacji podłoża w przepływie zależy zarówno od jego odporności na obróbkę termiczną, jak i możliwości uzyskania jednakowego jej przebiegu dla wszystkich elementów podłoża. W cieczach jednorodnych można łatwo uzyskać wyrównaną temperaturę i dlatego zaleca się prowadzić sterylizację w wysokiej temperaturze i bardzo krótkim czasie jej działania (UHT – *ultra high temperature*). Dla zawiesin zawsze występują różnice czasowe w uzyskaniu temperatury sterylizacji przez ciecz i cząstki stałe. W pierwszej fazie wymaganą temperaturę osiągnie ciecz, a następnie kolejno powierzchnia i środek cząstek stałych zawieszonych w tej cieczy. Opóźnienie to będzie zależało od różnych parametrów. W celu zminimalizowania negatywnych skutków tych różnic czasowych zaleca się obniżenie temperatury i wydłużenie czasu sterylizacji oraz ujednorodnienie wymiarów cząstek stałych. To ostatnie można uzyskać poprzez odpowiednie przygotowanie zawiesiny z zastosowaniem homogenizatora lub specjalnego młyna, czy też wcześniejszą segregację (oddzielenie cząstek o dużych rozmiarach) składników pożywki.

5. Uzyskanie i utrzymanie jałowości w fermentorze

Jałowość podłoża jest podstawowym warunkiem umożliwiającym prawidłową realizację procesu fermentacyjnego (biotechnologicznego), przy czym należy wyróżnić: sterylizację fermentora i podłoża oraz zabezpieczenie przed wtórnym zakażeniem. Bez względu na sposób sterylizacji (okresowy lub ciągły) zabezpieczenie fermentora przed wtórnym zakażeniem może być rozwiązane jednakowo. Różnica dotyczy sterylizacji fermentora i podłoża.

Podczas sterylizacji okresowej, jałowość fermentora i podłoża uzyskuje się jednocześnie. Stosując ten proces w przepływie należy oddzielnie i kolejno sterylizować: fermentor, instalację i podłoże. Realizuje się to w ten sposób, że wcześniej poddaje się sterylizacji termicznej fermentor i całą instalację (można jednocześnie), a następnie rozpoczyna się napełnianie fermentora sterylną pożywką. W praktyce fermentor i część przewodów sterylizuje się za pomocą pary o ciśnieniu około 0,25 MPa (około 125°C), a pozostałą instalację – krążącą w obiegu wodą o temperaturze około 125°C.

Stosowanie sterylizacji termicznej w przepływie umożliwia łatwe uzyskanie i utrzymanie jałowości podłoża. Warunkiem powodzenia jest używanie właściwej i odpowiednio oprzyrządowanej aparatury oraz przestrzeganie reżimu obsługi instalacji.

6. Możliwości wdrożenia do polskiego przemysłu ciągłej sterylizacji termicznej podłoży

Wydaje się, że w najbliższym czasie nowe warunki ekonomiczne zmuszą przemysłowców w Polsce do zamiany stosowanej dotąd termicznej sterylizacji okresowej na ciągłą. Zamiany tej będzie trzeba dokonać zakupując za granicą całą instalację, ewentualnie tylko pewnych jej elementów oraz zbudowanie całości z użyciem materiałów krajowych. Koszt budowy instalacji wg drugiej propozycji będzie około dwukrotnie niższy niż przy zakupie całej instalacji w firmie zagranicznej. Zgodnie z tą propozycją, wg założeń procesowych opracowanych przez zespół pracujący pod kierunkiem autora, zbudowano i uruchomiono (w listopadzie br.) instalcję pilotową do ciągłej sterylizacji roztworu cukru w ZD FKC „Cytrokwas" w Zgierzu. Rozpoczęte są prace dla innych podłoży.

Zakup lub zaprojektowanie instalacji do ciągłej sterylizacji podłoża winny być poprzedzone opracowaniem optymalnych warunków jego termicznej obróbki i sterylizacji. Można to osiągnąć w oparciu o analizę danych literaturowych lub badania doświadczalne. W 1989 r. uruchomiono zbudowaną w Politechnice Łódzkiej instalację doświadczalną do sterylizacji termicznej cieczy w przepływie z zastosowaniem metody UHT (19). Skuteczność jej pracy została pozytywnie oceniona przez pracowników Instytutu Technologii Fermentacji i Mikrobiologii Politechniki Łódzkiej. W 1987 r. uruchomiono w PŁ inną tego typu instalację doświadczalną (18). Obie instalacje mogą być wykorzystywane do opracowania optymalnych warunków obróbki termicznej w celu sterylizacji podłoży dla różnych procesów biotechnologicznych.

7. Podsumowanie

W pracy omówiono zasadę sterylizacji termicznej podłoży z podkreśleniem korzyści, jakie daje zastosowanie metody ciągłej w porównaniu z okresową. Przeanalizowano potrzebę doboru sposobu wymiany ciepła oraz możliwości jego realizacji podczas obróbki termicznej podłoży fermentacyjnych. Zaproponowano postępowanie przy wdrażaniu do polskiego przemysłu ciągłej sterylizacji termicznej podłoży.

Literatura

1. Ball C. O., Olson F. C. W., (1957), Sterilization in Food Technology, Mc Graw Hill Book Co., New York.
2. Boršnikov I. I., Bosienko A. M., (1982), Mašiny i apparaty mikrobiologičeškich proizvodstv, Wyssejšaja Škola, Mińsk.
3. Budsławski J., (1971), Zarys chemii mleka. Chemia i biochemia mleka oraz jego przetworów, PWRiL, Warszawa.
4. Campbell J. R., Marshall R., (1982), Podstawy produkcji mleka spożywczego i jego produktów, PWN, Warszawa.
5. Matveenko P. S., Stabnikov W. N., (1980), Strujnyje apparaty v piščevoj promyslennosti, Moskva.
6. Dikis M. Ja., Malskij A. N., (1961), Technologičeskoe oborudovanie konservnych zavodov, Piscepromizdat, Moskva.
7. Maslov A. M., (1980), Apparaty dla teploobrabotki vysokovjazkich zidkostiej, Mašinostroenie, Leningrad.
8. Reuter H., (1981), Anlagen zum Ultrahocherhitzen von Lebensmitteln. Stand der Technik und Optimierung, Chem. Ung. Tech., 53, 16, 406–418.
9. Ashley M. H. J., (1982), Continuous sterilization of media, Chem. Engineer., 377, February, 54–58.
10. Schael H. G., (1975), Mikrobiologia ogólna, PWRiL, Warszawa.
11. Molska I., (1988), Zarys mikrobiologii mleczarskiej, PWRiL, Warszawa.
12. Reuter H., (1979), UHT plants for milk state of technological development. Engineering and Food, 2, 651–658, Elsevier applied Science Publishers, London, New York.
13. Pijanowski E., (1980), Zarys chemii i technologii mleczarstwa, t.I, PWRiL, Warszawa.
14. Prospekt firmy APV.
15. Prospekt firmy α–Laval.
16. Robinson (1986), Modern Dairy Technology, 1, Advances in Milk Processing, Elsevier Applied Science Publishers.
17. Strumiłło Cz., Iciek J., Gwardys S., Ciesielski M., (1982), Układ do pasteryzacji i sterylizacji oraz chłodzenia wodnych roztworów i zawiesin, P–107813.
18. Iciek J., Cywińska U., Rogacki G., Stolarek P., Wańkowicz K., (1988), Sterylizacja cieczy i zawiesin z zastosowaniem strugowych wymienników ciepła, Przemysł Spożywczy, 12, 354–356.
19. Iciek J., Rogacki G., Stobińska H., Cywińska U., Stolarek P., Wańkowicz K., (1989), Ciągła, bezprzeponowa, termiczna sterylizacja cieczy oraz zawiesin, etap IV, Centralny Program Badań Podstawowych 04.11 zadanie 3.4., Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Łódzka.

Advantages and Conditions of Application of the Continuous Thermal Sterilization of Media

Summary

In the paper, the principle of thermal sterilization was presented and advantages of the continuous method application over the batch one were emphasized. The need for choosing a heat transfer method and the possibility of its application in the thermal processing of fermentation media were analyzed. A procedure for implementing the continuous thermal sterilization of media in Polish industry was proposed.

Adres dla korespondencji:

Jan Iciek, Instytut Chemicznej Technologii Żywności, Politechnika Łódzka, ul. Stefanowskiego 4/10, 90–924 Łódź.