

Dr hab. inż. Agnieszka KALETA, prof. SGGW  
Mgr inż. Aneta CHOJNACKA  
Wydział Inżynierii Produkcji, SGGW w Warszawie

## ROZWAŻANIA NA TEMAT METOD ZWIĘKSZANIA EFEKTYWNOŚCI WYMIANY CIEPŁA W WYMIENNIKACH CIEPŁA STOSOWANYCH W PRZEMYŚLE MLECZARSKIM®

*Do pasteryzacji mleka i produktów mlecznych najczęściej wykorzystywane są wymienniki płytowe (zwane pasteryzatorami), w sterylizacji najpopularniejsze są rozwiązania rurowe (sterylizatory). Metody zwiększania efektywności wymiany ciepła zostały podzielone na dwie grupy. Pierwsza z nich obejmuje sposoby wykorzystywane na etapie projektowania. Należą do nich profilowanie płyt oraz dobór wymiennika. Druga grupa odnosi się do metod, które mogą być stosowane w trakcie użytkowania wymienników ciepła. W tym przypadku można regulować natężenie przepływu czynników, a także sterować częstotliwością procesu mycia.*

**Słowa kluczowe:** wymienniki ciepła, przemysł mleczarski, efektywność, natężenie przepływu, współczynnik przenikania ciepła.

### WSTĘP

Aktywny tryb życia, ciągły pośpiech, oszczędność czasu w przygotowywaniu posiłków to czynniki, które spowodowały, że przetwórstwo żywności odgrywa coraz większą rolę. Konsumenci bardzo chętnie nabywają półprodukty i produkty gotowe. W przemyśle mleczarskim szczególnie dużym zainteresowaniem cieszą się jogurty. Spożycie tych produktów w Polsce w roku 2007 wzrosło o blisko 19% w stosunku do roku poprzedniego [19]. Ze względu na wysokie walory odżywcze wielu dietetyków zaleca spożywanie produktów mlecznych 2-3 razy dziennie, szczególnie w postaci mleka, jogurtu i sera.

Istotne znaczenie ma także przechowywanie produktów nabiałowych. Decydujący w tej kwestii jest możliwie jak najdłuższy termin przydatności do spożycia. Z zagadnieniem tym ściśle łączą się procesy obróbki cieplnej, w szczególności sterylizacja. Produkty UHT można bowiem bezpiecznie przechowywać nawet przez okres kilku miesięcy. Procesowi sterylizacji poddawane jest nie tylko mleko, ale również opakowania. Produkty sterylizowane wymagają aseptycznego pakowania, co zapewnia odpowiednią higienę procesu [20]. W zakładzie mleczarskim surowiec (mleko) jest poddawany działaniu procesów cieplnych w celu zapewnienia odpowiedniej jakości produktu. Istnieje wiele technik, które zapewniają otrzymanie bakteriologicznie bezpiecznego mleka. Należy jednak pamiętać, iż każda z nich wywołuje pewne ubytki w wartościach odżywczych gotowego produktu [3]. Na jakość produktu mają wpływ nie tylko reakcje cieplne. Nie można pominąć w tym miejscu osadów gromadzących się na ściankach wymienników jako wyniku reakcji składników mleka na działanie temperatury [8]. Procesy termiczne są realizowane głównie przy użyciu wymienników ciepła. Aparaty te umożliwiają podgrzewanie, a także chłodzenie produktów mlecznych przy zachowaniu odpowiedniej higieny oraz wymagań systemu HACCP.

W przemyśle mleczarskim powszechnie stosowane są dwa rodzaje urządzeń: płytowe i rurowe wymienniki ciepła.

Krótkie porównanie dwóch wspomnianych typów wykazuje, że wymienniki płytowe są bardziej elastyczne jeśli chodzi o wprowadzanie zmian w ich budowie. Można bowiem odpowiednio regulować liczbę płyt w wymienniku. W zestawieniu z wymiennikami rurowymi, płytowe aparaty dają większe możliwości przebudowy. Należy jednak pamiętać, że płyt nie można zestawiać w dowolny sposób [28].

Efektywność jest pojęciem, które nie ma jednoznacznej treści empirycznej. Może być ona rozumiana jako dodatnia cecha działań służących osiągnięciu jakiegoś pozytywnego wyniku [17]. Powszechnie efektywność jest uznawana jako wynik aktywności ekonomicznej będącej współczynnikiem uzyskanego efektu do poniesionych nakładów. Obecnie coraz częściej zagadnienie efektywności łączy się z ekoefektywnością, która ma na celu osiąganie wysokich standardów środowiskowych, a te z kolei przekładają się na zmniejszenie negatywnego wpływu zakładu produkcyjnego na środowisko [26]. Wysoka efektywność może zostać osiągnięta, gdy na przykład zostanie zmniejszone zużycie zasobów naturalnych, ograniczona będzie emisja substancji zanieczyszczających środowisko.

### CEL I ZAKRES

**Celem pracy zaprezentowanej w artykule jest analiza metod zwiększania efektywności wymiany ciepła w wymiennikach ciepła stosowanych w przemyśle mleczarskim.** Zakres artykułu obejmuje omówienie zagadnienia na przykładzie dwóch typów wymienników ciepła (płytowe, rurowe) najczęściej wykorzystywanych w przemyśle mleczarskim. Metody te można przedstawić w dwóch płaszczyznach: sposoby wykorzystywane przez użytkowników wymienników ciepła oraz metody stosowane przez projektantów tych urządzeń.

### POJĘCIE EFEKTYWNOŚCI

Pojęcie efektywności funkcjonuje w praktyce i teorii od momentu pojawienia się człowieka. Istota ludzka od zawsze bowiem chciała „wygodniej żyć”. Efektywność w języku polskim jest utożsamiana z takimi określeniami jak pozytywny wynik, skuteczność, sprawność działania. W literaturze ekonomiczno-rolniczej ocena efektywności bardzo często jest

związana z relacją pomiędzy ilością wytworzonych produktów czyli wynikami (efektami, rezultatami), a ilością zużytych w procesie produkcji czynników czyli nakładami.

Według nauk prakseologicznych wydajność określa się jako formę ekonomiczności z punktu widzenia skuteczności działań. W technice, podobnie jak w ekonomii, wydajność oznacza uzyskany efekt w jednostce czasu. Wydajność procesu technologicznego jest określana jako stosunek ilości produktu otrzymanego w określonym czasie trwania procesu do ilości produktu określonej teoretycznie w tym samym czasie [17].

W rozważaniach na temat efektywności należy brać pod uwagę także względy środowiskowe, aby działalność ludzka była przyjazna otoczeniu i nie wywoływała trwałych zmian. Efektywność energii może być definiowana jako spadek zużycia energii, który ma miejsce na etapie przetwarzania, przekazywania, dystrybucji lub końcowego użycia wpływającego na zmiany w technologii, zapewnienie tego samego lub wyższego poziomu produkcji [27]. Źródłem około 90% energii są paliwa kopalne: węgiel 25%, ropa 40%, gaz 25% [24]. Ograniczone pozyskanie energii ze źródeł kopalnych oraz kwestia środowiska będzie prawdopodobnie kierowała uwagę konsumentów w kierunku ekologicznej gospodarki energią. Efektywna gospodarka łączy się bezpośrednio ze zmniejszeniem kosztów prowadzenia działalności (opłacalność). Wpływa to także na ograniczenie zanieczyszczenia środowiska (ścieki). Określenie współczynników takich jak zużycie energii elektrycznej (kWh/1000 l mleka), zużycie paliw (kg/1000 l mleka), itp. pozwala na kontrolę i zmniejszenie niepokojących wartości tych wskaźników [27].

Efektywność cieplna  $\varepsilon$  wymiennika to stosunek dwóch mocy cieplnych [11]:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} \quad (1)$$

przy czym:  $\dot{Q}$  – aktualna moc cieplna, W;

$\dot{Q}_{\max}$  – maksymalna możliwa moc cieplna, W.

Maksymalna możliwa wielkość  $\dot{Q}_{\max}$  jest ograniczona w wymienniku ciepła różnicą temperatur czynników na wejściu do tego wymiennika, czyli przez  $\Delta t_{\max} = t_{pg} - t_{pz}$  (przy czym  $t_{pg}$  jest temperaturą początkową czynnika gorącego, a  $t_{pz}$  oznacza temperaturę początkową czynnika zimnego).

Wobec powyższych informacji w dalszej części analizy efektywność będzie traktowana jako wydajność (efektywna wymiana, wydajna wymiana) określana przy pomocy strumienia ciepła  $\dot{Q}$ . Wymiarowym sposobem na wyrażenie wydajności jest *strumień ciepła*  $\dot{Q}$ , który wyznacza się z następującej zależności:

$$\dot{Q} = kF\Delta t_m \quad (2)$$

w której:  $k$  – współczynnik przenikania ciepła, W/(m<sup>2</sup>K);

$F$  – powierzchnia wymiany ciepła, m<sup>2</sup>;

$\Delta t_m$  – średni spadek temperatury nazywany średnią logarymiczną, K (lub °C).

Aby wymiana ciepła była efektywna, z przemysłowego punktu widzenia (tj. produktu końcowego), należy dążyć do osiągnięcia jak największych wartości  $\dot{Q}$ .

W przedstawionym wzorze  $\dot{Q}_{\max}$  przyjmuje wartość stałą, wobec czego wzrost osiąganego strumienia ciepła wpłynie na wzrost ogólnej efektywności  $\varepsilon$ .

## OMÓWIENIE METOD ZWIĘKSZANIA EFEKTYWNOŚCI WYMIANY CIEPŁA W WYMIENNIKACH CIEPŁA

Do metod zwiększających efektywność wymiany ciepła można zaliczyć:

- dobór odpowiedniego profilu płyty,
- dobór odpowiedniego wymiennika ciepła,
- odpowiednie sterowanie natężeniem przepływu,
- właściwe mycie wymiennika ciepła.

### Profil płyty

Wymienniki ciepła zaczęto stosować na skalę przemysłową od około 1923 roku. W tamtym okresie, Seligmann wynalazł płytowy wymiennik ciepła przeznaczony dla przemysłu mleczarskiego [18].

Pakiet płyt jest jednym z elementów konstrukcyjnych stanowiącym największą część wymiennika płytowego i spełniającym zasadniczą funkcję. Płyty tworzą powierzchnię roboczą i umożliwiają wymianę ciepła między czynnikami przepływającymi przez wymiennik. Każda z płyt zawiera trzy podstawowe elementy, przedstawione na rysunku 1.



A – główna strefa wymiany ciepła, usytuowana w środkowej części płyty, stanowi obszar krytyczny dla wytworzenia przepływu o najwyższej burzliwości, zgodnie z wymaganym spadkiem ciśnienia.

B – obszar dystrybucji, występujący w górnej i dolnej części płyty, odpowiada za równomierne rozproszanie mediów na całej szerokości płyty, eliminując w ten sposób „martwe” przestrzenie.

C – główny element narożnej części płyty stanowi otwór – króciec wlotowy zaprojektowany dla niskiego spadku ciśnienia, jak również dla mniejszych prędkości przepływu. Króćce umożliwiają doprowadzenie czynników do wymiennika, a także ich późniejsze odprowadzenie.

Rys. 1. Główne części płyty w wymienniku ciepła.

Proces przepływu (wymiany) rozpoczyna się w miejscu usytuowania otworów (na rys. 1-C). Płyn jest doprowadzony do odpowiednich kanałów. Płyty o zaślepionych otworach dają możliwość zmiany kierunku przepływu czynnika, tworząc w ten sposób układ wielobiegowy (szeregowy, równoległy lub mieszany) [28]. Następnie płyn przepływa przez obszar B, aby w centralnej części płyty doszło do wymiany ciepła. Wielkość powierzchni płyty jest bardzo istotna, a to przekłada się na jej ukształtowanie, czyli sposób w jaki jest

wyżłobiony profil płyty. Obecnie dąży się do tego, aby powierzchnia płyt była jak największa, ale równocześnie by zestaw płyt zajmował możliwie mało miejsca. Profil płyty jest to rodzaj wzoru oraz głębokość wytłoczenia tego wzoru na płycie wymiennika. W wyniku tego wytłoczenia (profilu) płyta jest silnie „pofałdowana”, co zwiększa jej powierzchnię i zapewnia większą sztywność [12, 28]. Wymiary zewnętrzne dwóch dowolnych płyt (tj. długość i szerokość) mogą przyjmować bardzo podobne wartości, natomiast parametry takie jak powierzchnia płyty i pojemność kanałów mogą w tych dwóch przypadkach osiągać różne wartości. Jest to spowodowane innym układem wzorów na płytach (profil), jak również głębokością ich wytłoczenia. Oprócz odpowiedniej wielkości, płyta powinna spełniać także inne wymagania, a między innymi to, że kanały przepływowe powinny być dostosowane do właściwości medium przepływającego przez wymiennik.

Płyty o takim samym profilu oraz powierzchni mogą różnić się między sobą. W tym przypadku wyróżnikiem jest kąt wytłoczenia. Zwykle wytłoczenia wykonane pod kątem 30° optycznie wydają się być poziome. Patrząc na płytę, której profil wytłoczono pod kątem 60° można uznać, że wzory układają się pionowo.

Profil płyt przyczynia się nie tylko do zwiększenia powierzchni płyty, ale także do zwiększenia turbulencji przepływu. Jest to korzystne, gdyż podczas przepływu turbulentnego wymiana ciepła przebiega szybciej niż miałoby to miejsce w przypadku przepływu laminarnego.

Ze względu na zanieczyszczenia gromadzące się na ściankach wymienników niewskazane są powierzchnie chropowate [15]. Badania [2] wykazały silny związek pomiędzy wzorem płyty i tendencją do powstawania osadu. Wysoki stopień turbulencji w wymiennikach ciepła ogranicza gromadzenie się osadów na gorącym zakończeniu płyty, co i tak w rezultacie redukuje wymieniane ciepło nawet do 20%.

### Dobór wymiennika ciepła

Działania związane z wyborem wymiennika ciepła są wspomagane programami komputerowymi, przygotowanymi przez producentów urządzeń. Do najbardziej istotnych parametrów, jakie należy brać pod uwagę przy wyborze wymiennika ciepła należą:

- temperatury początkowe (wejściowe) i końcowe (wyjściowe) czynników, między którymi następuje wymiana ciepła,
- natężenie przepływu, określające z jaką prędkością czynniki przepływają przez wymiennik ciepła,
- współczynnik przenikania ciepła,
- strumień wymienianego ciepła,
- powierzchnia wymiany ciepła.

Bardzo często brane są pod uwagę także dopuszczalne spadki ciśnień, głębokość kanałów (w zależności od struktury czynników, np. zawartości cząstek stałych), wzór wytłoczenia tych kanałów i inne. Stopień szczegółowości wprowadzanych danych zależy od stopnia złożoności programu, od liczby operacji jakie wykonuje.

Dla osiągnięcia optymalizacji doboru wymienników ciepła należy pamiętać o zalecanym zapasie powierzchni. Wymagane przewymiarowanie uwzględnia nie tylko zanieczyszczenia,

ale także zmianę właściwości fizykochemicznych czynników, niedokładność projektu czy też zmianę warunków pracy instalacji [5].

L. Zander i Z. Zander [28] przedstawili ogólny tok postępowania projektowego przy komponowaniu konfiguracji połączeń w płytowym wymienniku ciepła. Opisany tok postępowania wyjaśnia zasady, jakimi kierują się producenci gotowych aparatów oraz umożliwia inżynierowi opracowanie konfiguracji wymienników dostosowanych do konkretnych potrzeb.

Aparatura przeznaczona do realizacji operacji w przemyśle spożywczym powinna być zaprojektowana tak, aby nie tylko spełniała mechaniczne funkcje, należy także pamiętać o wymiarze higienicznym. Żadna liczba zasad HACCP-u w kwestii zarządzania półproduktami czy materiałem surowym oraz zarządzania w obszarze obsługiwanie maszyn nie jest w stanie zrekomensować wad urządzeń zaprojektowanych w stopniu niewystarczającym pod względem higienicznym [4].

Jednocześnie są opracowywane modele matematyczne pracy wymienników ciepła oparte na teorii przepływu płynów i wymiany ciepła. Symulacje komputerowe przeprowadzone z wykorzystaniem tych modeli pozwalają dogłębniej poznać warunki pracy wymienników ciepła stosowanych w przemyśle mleczarskim. Sahoo i in. [21] opracowali iteracyjną technikę wyznaczania współczynnika przenikania ciepła. Sahoo i in. [22] sformułowali matematyczny model pozwalający przewidywać narastanie osadu (kamienia) mlecznego w wymienniku ciepła w funkcji czasu i miejsca. Z przeprowadzonych symulacji wynika, że zjawisko powstawania tego osadu zależy od temperatury na powierzchni międzyfazowej osad-płyn i od naprężeń w płynie przy powierzchni wymiany ciepła. Nema i Datta [15, 16] opracowali model, który umożliwia kontrolę temperatury lub ciśnienia pary, co pozwala na przeciwdziałanie spadkowi temperatury mleka (na wyjściu z wymiennika) spowodowanego narastaniem kamienia mlecznego. Autorzy stwierdzili, że model ten po odpowiednich modyfikacjach, może znaleźć zastosowanie w przemysłowych sterylizatorach. Uzyskane wyniki symulacji potwierdzają spostrzeżenia sformułowane w pracy [22]. Matematycznym modelowaniem pracy wymienników ciepła stosowanych w przemyśle mleczarskim uwzględniającym powstawanie osadu mlecznego zajmowano się również w pracach [1, 7, 8, 13]. Jednocześnie są rozpatrywane energooszczędne systemy pasteryzacji mleka, takie jak np. składające się z regeneracyjnego wymiennika ciepła, pomocniczego ogrzewacza i pompy ciepła [23].

### Natężenie przepływu

Aby uzyskać założone natężenie strumienia ciepła, konieczna jest odpowiednia różnica temperatur. Procesy przepływu ciepła można więc regulować za pomocą regulacji temperatury. Dla posiadacza (użytkownika) wymiennika ciepła (pasteryzatora lub sterylizatora) najważniejszym parametrem jest temperatura wyjściowa produktu, tj. temperatura otrzymywana po zakończeniu procesu termicznego na wyjściu z wymiennika ciepła. W niektórych przypadkach jest ona punktem krytycznym HACCP. Oznacza to, że parametr ten jest kontrolowany ze względu na jego istotne znaczenie z punktu widzenia jakości produktu. W celu sprawdzenia warunków pasteryzacji czujnik temperatury powinien być zainstalowany na końcu przytrzymywacza (tu odbywa się właściwa pasteryzacja). W warunkach przemysłowych jest dopuszczalny

spadek temperatury w pasteryzatorze (pomiędzy temperaturą wejściową a wyjściową w przytrzymywaczu), wynoszący nie więcej niż 0,1°C [14]. Jeżeli temperatura mleka mierzona na wyjściu z wymiennika, nie osiągnie zadanej wartości, to mleko jest ponownie kierowane do wymiennika w celu powtórnej obróbki cieplnej. Juszka i Tomasik [10] opracowali koncepcję automatycznego systemu sterowania procesem pasteryzacji mleka oraz wizualizacji tego procesu umożliwiającą: 1) bardzo dokładną kontrolę procesu poprzez prowadzenie pełnej archiwizacji danych procesowych (warunków pracy, zadawanych parametrów wejściowych), późniejszą analizę i weryfikację; 2) bieżącą kontrolę i regulację temperatury wyjściowej produktu w czasie trwania procesu; 3) planowanie zadań produkcyjnych, dynamiczną zmianę programów produkcji, lokalizowanie tzw. wąskich gardeł.

Równoległe do procesu kontroli temperatury odbywa się sterowanie przepływem, zarówno wody (pary) jak i mleka. Jeżeli temperatura wyjściowa mleka spada, wtedy zostaje obniżone jego natężenie przepływu. Jeżeli ten zabieg nie przynosi oczekiwanych efektów (nadal nie jest możliwe osiągnięcie odpowiedniej temperatury pasteryzacji), może zostać podniesiona temperatura wody lub natężenie przepływu wody ogrzewającej sekcję pasteryzacji. Podwyższenie temperatury pary wodnej jest również jednym ze sposobów pokonania problemu spadku temperatury mleka (wywołanego narastaniem osadu mlecznego) i umożliwienia przedłużenia czasu trwania procesu sterylizacji zanim proces ten zostanie zatrzymany w celu umycia wymiennika. Za pomocą matematycznego modelu można wyznaczać jaki powinien być wzrost temperatury pary wodnej niezbędny do utrzymania wymaganej temperatury sterylizacji mleka [15, 16].

Natężenie przepływu mleka jest takie samo w całym wymienniku ciepła. Tak więc w sekcji chłodzenia (przy obniżonym natężeniu przepływu mleka) nie zawsze jest konieczne zwiększanie przepływu wody chłodzącej. Zmniejszenie natężenia przepływu mleka powoduje wydłużenie czasu trwania wymiany ciepła. W takiej sytuacji obniżeniu ulega wydajność wymiennika ciepła wyrażona w l/h, a więc zostanie wyprodukowana mniejsza ilość produktu. Jest to informacja, że wymiennik stracił swoją efektywność i należy go umyć w celu przywrócenia pierwotnych parametrów pracy.

### Proces mycia

Czystość maszyn i urządzeń wchodzących w skład linii produkcyjnych odgrywa bardzo duże znaczenie w utrzymaniu higienicznych warunków w czasie produkcji mleka. Mycie ma na celu usunięcie pozostałości mleka, kamienia mlecznego oraz innych zanieczyszczeń. Proces powstawania kamienia mlecznego jest jednym z głównych wyzwań zarówno dla praktyków jak i dla badaczy. Właściwa i efektywna kontrola powstawania tego osadu wymaga precyzyjnego pomiaru jego ilości, grubości i rozkładu. Dotychczas nie podano jeszcze kompletnego i zadawalającego mechanizmu tworzenia się kamienia mlecznego w wymiennikach ciepła [16].

Znane są dwa rodzaje osadów mlecznych. Pierwszy z nich to osad stosunkowo miękki, tworzący się w temperaturze 75-115°C. Ze względu na wysoką zawartość białka (50-70% mas.) ten typ kamienia jest nazywany białkowym. Drugi typ osadu jest formowany w wyższych temperaturach, powyżej 110°C. Jest twardy, ma strukturę granulatu o dużej zawartości składników mineralnych (do 80% mas.) i dlatego jest nazywa-

ny osadem mineralnym. Stwierdzono, że na rodzaj powstającego osadu ma wpływ skład mleka zależny od pory roku czy „wieku” mleka (świeże mleko poddane bezpośrednio obróbce cieplnej powoduje mniejszy osad niż mleko przetwarzane po kilku dniach przechowywania w chłodni). Wielu badaczy [9] wykazało korelację między denaturacją białek w mleku i tworzeniem się kamienia w wymiennikach ciepła. Badania doświadczalne wykazały, że  $\beta$ -laktoglobulina odgrywa główną rolę w procesie powstawania osadu. Denaturacja tego białka i tworzenie się osadu występuje równocześnie podczas przepływu mleka przez wymiennik ciepła. Powstawanie kamienia w danym miejscu aparatu jest rozpatrywane jako heterogeniczna reakcja adsorpcji składników mleka na powierzchni. Białka łączą się w agregaty, które są transportowane do ściany wymiennika ciepła, na której adsorbują tworząc kamień [9]. Na szybkość tworzenia się osadu mają wpływ również geometria płyt wymiennika, warunki hydrodynamiczne panujące w aparacie, obecność pęcherzyków powietrza w mleku i rodzaj materiału, z którego zrobione są płyty [8]. W aparatach przepływowych, w których występują duże siły ścinania, powstający osad jest cieńszy, jego grubość dochodzi tylko do kilku mikronów, jest on jednak bardziej zbity. W pozostałych aparatach grubość kamienia może dochodzić nawet do kilku centymetrów [12]. Grubość osadu nie jest równomierna w całym wymienniku, co jest zapewne spowodowane rozkładem temperatur w aparacie [6, 7].

W przemyśle mleczarskim gromadzenie się kamienia mlecznego jest zjawiskiem trudnym do uniknięcia. Eksperymenty pokazują, że tworzenie się osadu można ograniczyć obniżając temperaturę ścian aparatu, zwiększając turbulencję i prędkość przepływu mleka [15]. Pewną alternatywą może okazać się użycie żywnościowych substancji powierzchniowo czynnych. Takie rozwiązanie może przyczynić się do stworzenia „współzawodnictwa” podczas procesu adsorpcji między substancją powierzchniowo-czynną a cząsteczkami białka, co pozwoli na uniknięcie formowania się kamienia na powierzchniach wymienników ciepła. Natomiast dodanie emulgatora może zapobiec łączeniu się białek w agregaty [13].

Mycie przeprowadza się za pomocą chemicznych środków myjących. Do mycia instalacji nabiałowej jest stosowane najczęściej mycie dwufazowe (ługowanie i kwasowanie). Najpopularniejszym rozwiązaniem jest metoda CIP (ang. cleaning in place). Stacje CIP są na trwałe połączone z linią technologiczną, a w czasie normalnej pracy urządzeń (podczas przepływu mleka) system ten jest odłączony za pomocą odpowiednich zaworów. Stacje CIP umożliwiają ponowne wykorzystanie wody (wcześniej posłużyła do płukania wymiennika) do przygotowania roztworów myjących. Takie rozwiązanie pozwala na częściowe ograniczenie zużycia wody [25]. W zakładach mleczarskich jednostkowe zużycie wody wyrażone w litrach na kilogram produktu mieści się w granicach 2, 21-9, 44 [26]. Wskaźnik ten jest ściśle związany z gospodarką wodno-ściekową. Ta z kolei pociąga za sobą koszty związane z energochłonnością oczyszczania ścieków mleczarskich o dużym ładunku chemicznym.

Obecność osadów zalegających na ściankach wymiennika jest niekorzystna przede wszystkim z dwóch powodów. Ze względów higienicznych, gdyż osady zawierające składniki mleka stanowią dobre podłoże dla rozwoju bakterii. Natomiast z drugiej strony osady te tworzą warstwę izolacyjną, która utrudnia i zakłóca przepływ płynu jak też wymianę cie-

pła. To z kolei powoduje wzrost spadku ciśnienia i może wywołać pogorszenie jakości produktu. Konieczne jest usuwanie osadu, co skraca bieżący czas pomiędzy cyklami mycia, a to powoduje wzrost kosztów [1].

W sytuacji, gdy wymiana ciepła będzie następowała w sposób prawidłowy (parametry procesu zostaną osiągnięte), ale proces ten będzie pochłaniał nadmierną ilość energii, trzeba przeprowadzić proces mycia. Powody jego zastosowania nie wypływają wtedy ze względów higienicznych. Mycie jest zwykle podyktowane względami higienicznymi, ale może być także traktowane jako czynnik wpływający na zwiększenie efektywności pracy pasteryzatora lub sterylizatora.

W jaki sposób warstwa osadu wpływa na pogorszenie warunków wymiany ciepła? Zagadnienie to zostanie przedstawione na przykładzie chłodzenia mleka po pasteryzacji. W obliczeniach założono, że proces ten odbywa się w siedmiorurowym wymienniku ciepła. Zakres temperatur czynników wynosi odpowiednio dla mleka 54-25°C, dla wody 7-25°C, co oznacza, że mleko jest chłodzone do temperatury 25°C.

Współczynnik przenikania ciepła  $k_1$  dla przegrody rurowej jest wyznaczony ze wzoru:

$$\frac{1}{k_1} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2\lambda_s} + \frac{\ln \frac{d_{2os}}{d_{1os}}}{2\lambda_{os}} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \quad (3)$$

przy czym:

- $\alpha_1$  – współczynnik wnikania ciepła do powierzchni wewnętrznej, W/(m<sup>2</sup>K);
- $\alpha_2$  – współczynnik wnikania ciepła od powierzchni zewnętrznej, W/(m<sup>2</sup>K);
- $\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła w materiale rurek, W/(mK);
- $d_1$  – wewnętrzna średnica rurek, m;
- $d_2$  – zewnętrzna średnica rurek, m. Indeks *os* odnosi się do osadu, a *s* do ścianki.

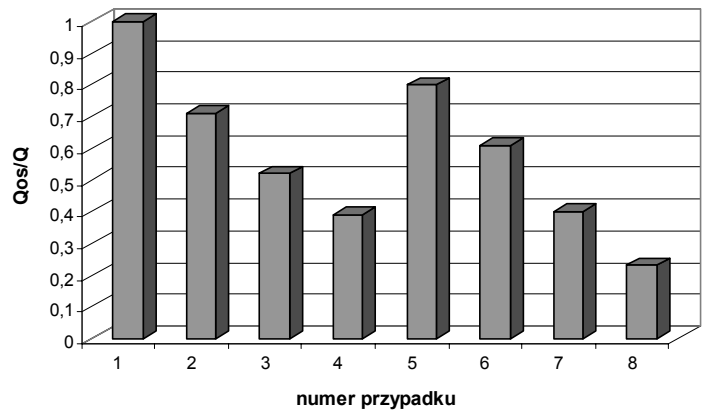
W zależności od grubości osadu, otrzymujemy różne wartości strumienia ciepła, które wyznacza się z zależności:

$$\dot{Q} = k_1 \pi L \Delta t_m \quad (4)$$

przy czym:  $L$  – długość rurek, m.

Na rysunku 2 przedstawiono zmiany strumienia ciepła  $\dot{Q}_{os}$  spowodowane powstawaniem osadu w stosunku do strumienia ciepła w wymienniku bez osadu  $\dot{Q}$  dla kamienia mlecznego i/lub kotłowego o różnych grubościach.

W przypadku 5, 6 i 7 została pokazana sytuacja narastania kamienia od zewnętrznej strony rurek. Wymienniki ciepła są myte regularnie od strony przepływu produktu spożywczego. Dochodzi jednak do powstawania kamienia także po stronie wody, zwłaszcza jeśli jest to woda gorąca. Obecnie mleczarnie stosują wodę uzdatnioną, co przyczynia się do powolniejszego powstawania kamienia. Tak więc w przypadku pasteryzacji może występować zarówno kamień mleczny (powszechne zjawisko) jak i kamień kotłowy (znacznie rzadziej). Przypadek 8 opisuje sytuację krytyczną, w której osad występuje po obu stronach rur.



**Rys. 2.** Zmiany strumienia ciepła  $\dot{Q}_{os}$  spowodowane powstawaniem osadu w stosunku do strumienia ciepła w wymienniku bez osadu  $\dot{Q}$ : 1-brak osadu; 2-kamień mleczny o grubości 0,0001 m; 3-kamień mleczny o grubości 0,00025 m; 4-kamień mleczny o grubości 0,0005 m; 5-kamień kotłowy o grubości 0,0001 m; 6-kamień kotłowy o grubości 0,00025 m; 7-kamień kotłowy o grubości 0,0005 m; 8-kamień mleczny wewnątrz rury o grubości 0,0005 m i kamień kotłowy na zewnątrz rury o grubości 0,0005 m.

Z rysunku wynika, że osad w znaczący sposób wpływa na spadek wartości strumienia wymienianego ciepła. Spadek ten jest większy ze wzrostem grubości osadu, przy czym kamień mleczny bardziej niekorzystnie wpływa na wymianę ciepła niż kamień kotłowy. Osad mleczny o grubości 0,0001 m (przypadek 2) powoduje, że strumień wymienianego ciepła wynosi 0,75 strumienia ciepła wymienianego w wymienniku bez osadu, dla osadu o grubości 0,00025 m (przypadek 3) wartość ta wynosi 0,55, a dla osadu o grubości 0,0005 m (przypadek 4) już tylko 0,39. W przypadku kamienia kotłowego stosunek strumienia ciepła wymienianego w wymienniku z osadem do strumienia ciepła wymienianego w wymienniku bez osadu wynosi kolejno: dla osadu o grubości 0,0001 m (przypadek 5) 0,82, dla osadu o grubości 0,00025 m (przypadek 6) 0,64 a dla osadu o grubości 0,0005 m (przypadek 7) 0,42. Bardziej niekorzystny wpływ kamienia mlecznego na wymianę ciepła jest spowodowany mniejszą wartością jego współczynnika przewodzenia ciepła w stosunku do tego współczynnika dla kamienia kotłowego. Jeżeli oba rodzaje osadu o grubości 0,0005 m występują jednocześnie (przypadek 8) omawiany parametr wynosi 0,26.

## WNIOSKI

Na efektywność wymiany ciepła mogą wpływać następujące czynniki:

- Profil płyty

Bardziej wyprofilowane płyty dają większą powierzchnię wymiany ciepła. Nie zawsze należy dążyć do zwiększania powierzchni grzejnej. Liczy się również wzór, jego ułożenie, a szczególnie kąt wytłoczenia wzoru na płycie. Płyty o kącie wytłoczenia 30° przyczyniają się do bardziej burzliwego przepływu i w porównaniu do płyt tłoczonych pod kątem 60° są mniej narażone na zarastanie kamieniem, co sprzyja dużym wartościom współczynnika przenikania ciepła.

▪ Dobór wymiennika ciepła

Jeśli dwa wymienniki ciepła spełniają warunki wymiany ciepła w takim samym stopniu, wtedy za reguły jest wybierany najtańszy. W takim przypadku decydują względy ekonomiczne, co przekłada się na efektywność ekonomiczną. Jeśli jednak dwa różne wymienniki spełniają warunki wymiany ciepła w różnym stopniu, należałoby wybrać ten model, który osiąga wyniki najbardziej zbliżone do optymalnych ze względu na technologię procesu.

▪ Natężenie przepływu

Spadek natężenia przepływu mleka spowoduje w konsekwencji spadek wydajności pasteryzatora/sterylizatora. Natomiast wzrost natężenia nie może następować w dowolnych granicach, gdyż pompa współpracująca z wymiennikiem ciepła ma określoną wydajność. Pomimo tego, że regulacja natężenia przepływu ma skutek krótkotrwały, jest stosowana wtedy, gdy pod koniec procesu technologicznego występują zakłócenia temperaturowe ze względu np. na powstawanie osadu. W takiej sytuacji przerwanie procesu w celu mycia instalacji jest nieekonomiczne i wtedy należy regulować natężenie przepływu czynników w odpowiednich granicach.

▪ Proces mycia

Konieczność mycia jest podyktowana głównie (choć nie tylko) zaleceniami higienicznymi. Jeśli warunki wymiany ciepła są zakłócone i produkt opuszczający wymiennik ciepła nie osiąga wymaganej przez technologię procesu temperatury, należy przeprowadzić mycie instalacji w celu poprawy warunków pracy pasteryzatora/sterylizatora. Mycie usuwa osad z kamienia mlecznego i kotłowego powodując zmniejszenie współczynnika przenikania ciepła i dlatego przyczynia się do zwiększenia efektywności wymiany ciepła. Mycie jest procesem krótkotrwałym, ale efekt utrzymuje się przez całą dobę.

## LITERATURA

- [1] Ansari I. A., Sharma M., Datta A. K.: Milk fouling simulation in a double heat exchanger, *International Comm. of Heat and Mass Transfer*, 2003, 30 (5), 707-716.
- [2] Bansal B., Müller-Steinhagen H., Chen X. D.: Performance of plate heat exchangers during calcium sulphate fouling – investigation with an in-line filter, *Chemical Engineering and Food Processing*, 2000, 39, 507-519.
- [3] Birlouez- Aragon I., Sabat P., Gouti N.: A new method for discriminating milk heat treatment, *International Dairy Journal*, 2002, 12, 59-67.
- [4] Dennis C.: Engineering and enhanced product confidence and safety, *Journal of Food Science*, 2004, 5, 255-257.
- [5] Figiel P.: Optymalizacja doboru płytowych wymienników ciepła, *Chłodnictwo*, 2002, 6, 22-23.
- [6] Galeazzo F. C. C., Miura R. Y., Gut J. A. W., Tadini C. C.: Experimental and numerical heat transfer in a plate heat exchanger, *Chemical Engineering Science*, 2006, 61, 7133-7138.
- [7] Georgiadis M. C., Macchietto S.: Dynamic modelling and simulation of plate heat exchangers under milk fouling, *Chemical Engineering Science*, 2000, 55, 1605-1619.
- [8] Grijpeerd K., Mortier L., De Block J., Van Renterghem R.: Applications of modelling to optimise ultra high temperature milk heat exchangers with respect to fouling, *Food Control*, 2004, 15, 117-130.
- [9] Jong P.: Impact and control of fouling in milk processing, *Trends in Food Science and Technology*, 1997, 8, 401-405.
- [10] Juszka H., Tomasik M.: Wizualizacja procesu przepływowej pasteryzacji mleka, *Acta Scientiarum Polonorum, Technica Agraria*, 2005, 4 (1), 77-83.
- [11] Kostowski E.: Przepływ ciepła, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2000.
- [12] Kukulka D. J., Devgun M.: Fluid temperature and velocity effect on fouling, *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27, 2732-2744.
- [13] Mahdi Y., Mounheb A., Oufier L.: A dynamic model for milk fouling in a plate heat exchanger, *Applied Mathematical Modelling*, 2009, 33, 648-662.
- [14] Morison K. R.: Steady-state control of plate pasteurizers, *Food Control*, 2005, 16, 23-30.
- [15] Nema P. K., Datta A. K.: A computer based solution to check the drop in milk outlet temperature due to fouling in a tubular heat exchanger, *Journal of Food Engineering*, 2005, 71, 133-142.
- [16] Nema P. K., Datta A. K.: Improved milk fouling simulation in a helical triple tube heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49, 3360-3370.
- [17] Praca zbiorowa pod redakcją Cygana Z.: Efektywność eksploatacji systemów technicznych, Warszawa, PWN, 1990.
- [18] Riberio Jr C. P., Andrade H. C.: An algorithm for steady-state simulation of plate heat exchangers, *Journal of Food Engineering*, 2002, 53, 59-66.
- [19] Rynek mleka 2008, 34, 13, Dział Wydawnictw IERiGŻ-PIB.
- [20] Sahoo P. K., Ansari I. A., Datta A. K.: Computer-aided design and performance evaluation of an indirect type helical tube ultra-high temperature (UHT) milk sterilizer, *Journal of Food Engineering*, 2002, 51, 13-19.
- [21] Sahoo P. K., Ansari I. A., Datta A. K.: A computer based iterative solution for accurate estimation of heat transfer coefficients in a helical tube heat exchanger, *Journal of Food Engineering*, 2003, 58, 211-214.
- [22] Sahoo P. K., Ansari I. A., Datta A. K.: Milk fouling simulation in helical triple tube heat exchanger, *Journal of Food Engineering*, 2005, 69, 235-244.
- [23] Söylemez M. S.: Optimum heat pump in milk pasteurizing for dairy, *Journal of Food Engineering*, 2006, 74, 546-551.
- [24] Vidil R., Marvillet Ch.: The innovation process in the energy field, *Energy*, 2005, 30, 1233-1246.
- [25] Wojdalski J., Drózd B.: Effect of various technical and organization-production factors on water consumption in milk production, *Annals of Warsaw Agricultural University – SGGW*, 2002, 42, 51-57.

- [26] Wojdalski J., Drózd B.: Ekoefektywność przemysłu mleczarskiego, *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 2008, 1, 89-92.
- [27] Wojdalski J., Drózd B., Brocki H.: Effectiveness of electrical energy and water consumption in a small-size dairy processing plant, *TEKA Komitetu Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 2008, 8, 303-309.
- [28] Zander L., Zander Z.: Projektowanie płytowych wymienników ciepła, *Instalacje Sanitarne*, 2003, 2 (7), 27-30.

## CONSIDERATION ON METHODS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF HEAT EXCHANGE IN HEAT EXCHANGERS APPLIED IN DAIRY INDUSTRY

### SUMMARY

*Plate heat exchangers (called pasteurizers) are most often used for pasteurization of milk and dairy products. Tubular heat exchangers (called sterilizers) are most popular in sterilization. The methods of increasing the efficiency of heat exchange are divided into two groups. The first one includes the ways used in the stage of design to which the profiling of plates and the selection of heat exchangers belong. The second group concerns the methods which can be applied during the usage of heat exchangers. In this case, the intensity of a media flow can be regulated and the frequency of wash process can be controlled.*

**Key words:** heat exchangers, dairy industry, efficiency, intensity of a media flow, heat transfer coefficient.