

ANALIZA NUMERYCZNA PRZEPŁYWU PŁYNU MIĘDZY PŁYTAMI PŁYTOWEGO WYMIENNIKA CIEPŁA*

Joanna Piepiórka-Stepuk, Marek Jakubowski

Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Politechnika Koszalińska

Streszczenie. Praca obejmuje analizę rozkładu prędkości przepływu cieczy w płytowym wymienniku ciepła. Badania przeprowadzono w oparciu o obliczenia numeryczne metodą objętości skończonych (FVM), w środowisku ANSYS CFX, na których podstawie wykreślono rozkłady prędkości przepływu w poszczególnych parach płytowych wymiennika oraz krzywe obrazujące prędkość przepływu w poszczególnych obszarach przestrzeni międzypłytywowej. Model obliczeniowy stanowił wymiennik zbudowany z pięciu par płytowych, które uproszczono do płyt płaskich. Na podstawie uzyskanych rozkładów prędkości stwierdzono, że najmniejsze wartości prędkości przepływu w płaskich płytach występują w osi symetrii każdej kolejnej płyty oraz w jej prawym górnym i dolnym narożu, usytuowanym przeciwległe do otworu odprowadzającego ciecz z przestrzeni międzypłytywowej. Uzyskane wyniki stanowią część badań dotyczących identyfikacji miejsc instalacji produkcyjnych niedomywanych w trakcie mycia w przepływie.

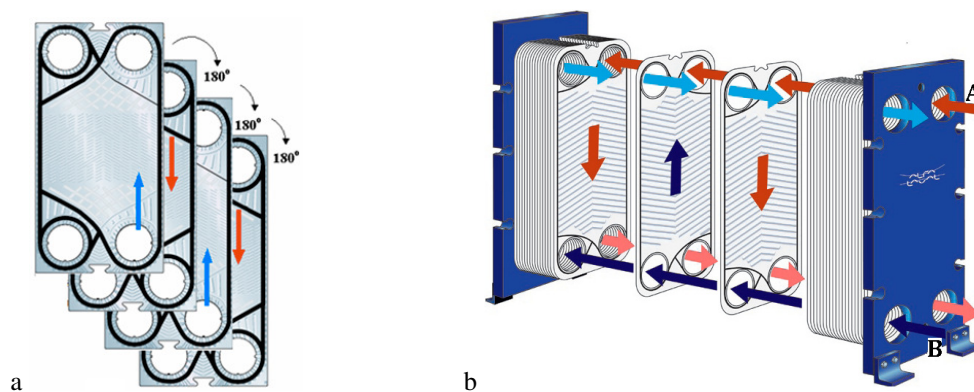
Słowa kluczowe: CFD, płytowy wymiennik ciepła, przepływ płynu, mycie w systemie CIP

WSTĘP

Płytowe wymienniki ciepła stosowane są w wielu gałęziach przemysłu, jednak najpowszechniej w przetwórstwie spożywczym. Spotkać je można głównie w mleczarstwie, brodawnictwie, przetwórstwie owocowo-warzywnym i tłuszczowym, gdzie pełnią ważną rolę w procesach związanych z intensywną wymianą ciepła. Zainteresowanie tymi aparatami wynika z ich wysokiej sprawności, ale również z prostej budowy i obsługi. Ich podstawowymi elementami konstrukcyjnymi są cienkie, specjalnie ukształtowane płyty z uszczelkami, obrócone w stosunku do siebie o 180° (rys. 1b). Płyty tworzą tzw. pary płytowe, pomiędzy którymi następuje przepływ czynników biorących udział w wymianie ciepła (Tsai i in., 2009), (rys. 1a). Kształt płyty decyduje nie tylko o charakterystyce cieplnej wymienni-

* Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2011, jako projekt badawczy Nr N N313 136838

ka, ale również wpływa na charakter przepływu. Z doniesień literatury wynika, że w płytowych wymiennikach ciepła występują obszary o podwyższonych temperaturach oraz o obniżonych prędkościach przepływu (Lozano i in., 2008; Jun i Puri, 2006). W aspekcie higieny produkcji żywności stanowi to duże zagrożenie, gdyż w miejscach tych, w szybkim tempie powstają duże ilości, mocno związanych z powierzchnią, osadów trudnych do usunięcia w standardowym procesie mycia. Tworzące się osady stanowią wiele problemów eksploatacyjnych, gdyż negatywnie wpływają na procesy przenoszenia ciepła między ośrodkami przepływowymi, podwyższają opory przepływu oraz powodują korozję na płytach, jak również powodują problemy związane z zachowaniem odpowiedniego poziomu higieny (Gillham i in., 2000; Jun i Puri, 2006; Merheb i in., 2007). Jest to szczególnie dostrzegalne w przemyśle mleczarskim, gdzie pasteryzatory mleka w szybkim tempie zanieczyszczają się trudnymi do usunięcia osadami białkowo-tłuszczowymi, w wyniku czego wymienniki wymagają co pół roku demontażu i mycia w systemie COP.



Rysunek 1. a – Sposób łączenia płyt wymiennika; b – Przepływ czynników termicznych w płytowym wymienniku ciepła
 Figure 1. a – Method of joining plates of the exchanger; b – Flow of thermal factors in the plate heat exchanger

Źródło: materiały firmy Alfa Laval

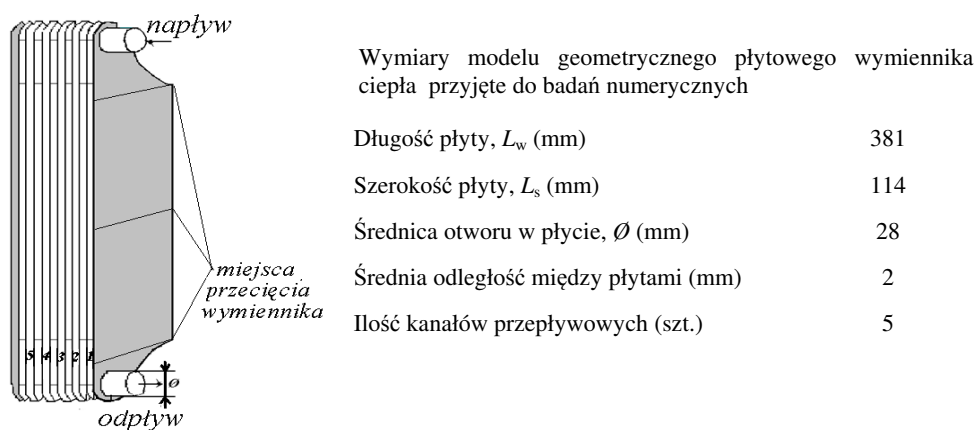
Standardowe mycie płytowych wymienników ciepła odbywa się w przepływie z wykorzystaniem stacji mycia CIP. Przepływająca ciecz myjąca powoduje zwilżanie i rozpuszczanie zanieczyszczeń, jak również ich oderwanie od powierzchni i odprowadzenie z instalacji. Skuteczność mycia w systemie CIP uwarunkowana jest jednak czynnikami przepływu cieczy przez myte elementy oraz zależy od dostępności mytych powierzchni. Z doniesień literatury wynika, że mycie w systemie CIP nie zawsze przynosi oczekiwane rezultaty (Austin i Bergeron, 1995; Lelievre i in., 2002b), zatem nie zawsze powyższe warunki są spełnione. Należy więc określić rozkłady prędkości w płytowych wymiennikach ciepła. Ponieważ eksperymentalnie jest to trudne do wykonania, najlepszym narzędziem do tego celu są metody obliczeń numerycznych, które umożliwiają łatwe, szybkie i tanie rozwiązywanie problemów inżynierskich.

Cel badań

Celem badań było określenie rozkładu prędkości przepływu cieczy w płytowym wymienniku ciepła oraz w jego kolejnych parach płytowych. Na podstawie wykonanych badań określono obszary o obniżonych wartościach prędkości przepływu, w których mogą intensywniej narastać zanieczyszczenia oraz które trudniej są wmywane podczas mycia w przepływie.

Materiał i metody

Do badań wykorzystano metodę objętości skończonych FVM, na której bazuje program CFX, stanowiący jeden z modułów pakietu do obliczeń numerycznych o nazwie ANSYS. Obliczeniowy model geometryczny odzwierciedlał przestrzeń między dwoma płytami typu „*staight flow*”, tworzącymi pięć kolejnych par płytowych (rys. 2).

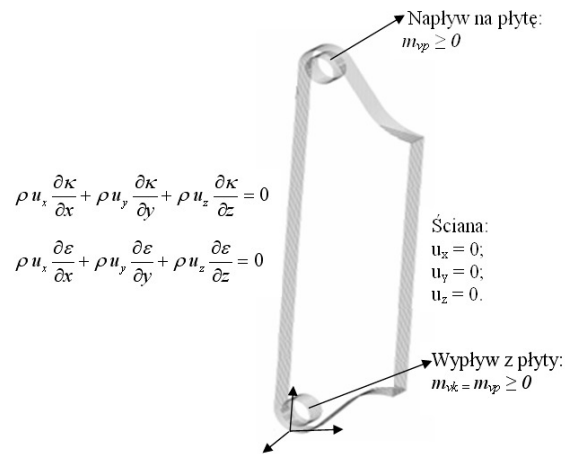


Rysunek 2. Płytowy wymiennik ciepła z zaznaczonymi miejscami przecięcia
 Figure2. The plate heat exchanger with indicated places of crossing

Do modelu geometrycznego wprowadzono pewne uproszczenia w postaci gładkich płyt oraz braku miejsc, w których płyty stykają się między sobą. Grubość szczeliny między płytami wymiennika wynosiła 2 mm. Do dyskretyzacji modelu obliczeniowego wykorzystano siatkę regularną o wielkości elementu 0,002 m, w wyniku czego uzyskano 1100000 elementów obliczeniowych. Do obliczeń zastosowano półempiryczny model turbulencji $\mathcal{K} - \mathcal{E}$, zawierający równanie dla kinetycznej energii turbulencji \mathcal{K} oraz prędkości dyssypacji \mathcal{E} (Elsner, 1987; Kazimierski, 2004; Luan i in., 2008; Gryboś, 1989). W celu rozwiązania równań bilansowych zdefiniowano i wprowadzono warunki brzegowe oraz początkowe. Przyjęte warunki wynikają z oddziaływań płyt, tworzących przestrzeń przepływową w postaci zerowych wartości prędkości na ścianach i krawędziach płyt oraz zerowych wartości energii kinetycznej i prędkości dyssypacji. Warunki początkowe ustalono na pod-

stawie badań eksperymentalnych, jako masowe natężenie przepływu wody o wartości $V_m = 1,5 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ na rurociągu doprowadzającym ciecz do wymiennika oraz ciśnienie równe $p = 0,3 \text{ bara}$ na rurociągu odprowadzającym (rys. 3). Z przyjętych warunków wynika, że obliczeniowa średnia prędkość przepływu między płytami wynosi ok. $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, co odpowiada wartości liczby Reynoldsa $Re = 5112$. W literaturze przyjmowane są różne wartości krytyczne charakteryzujące przepływ turbulentny w płytowych wymiennikach ciepła, co uzależnione jest głównie od typu płyty oraz od jej geometrii. Islamoglu i Parmaksizoglu (2003) oraz Akturk i in. (2011) burzliwy charakter przepływu określają liczbą Reynoldsa Re w przedziale od 450 do 5250. Zatem można przyjąć, że dla powyższych badań mamy do czynienia z przepływem turbulentnym.

Rysunek 3. Warunki brzegowe i początkowe dla przepływu w płytowym wymienniku ciepła
Figure 3. Boundary and initial conditions for the flow in the plate heat exchanger



W celu przeprowadzenia obliczeń numerycznych określono następujące założenia i uproszczenia modelu:

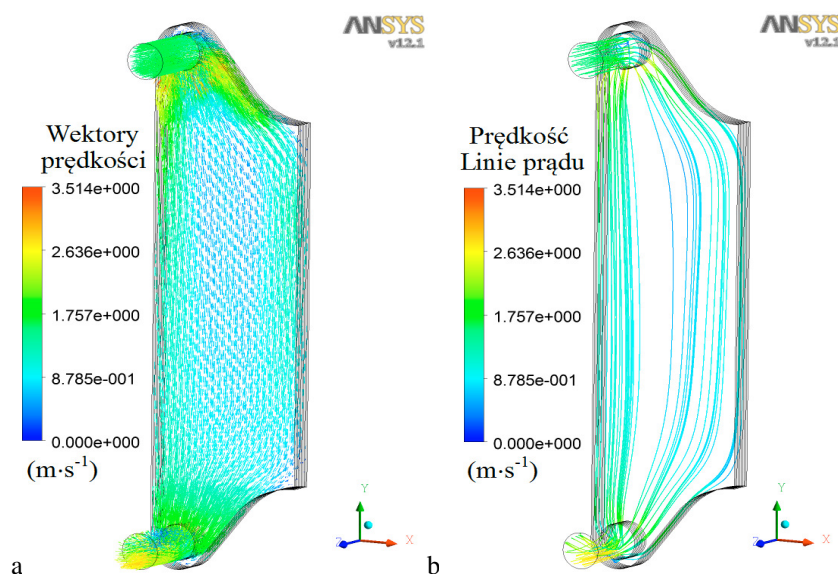
- brak wymiany ciepła w wymienniku oraz energii cieplnej przekazywanej do otoczenia (izotermiczne warunki przepływu);
- płynem przepływającym przez płytowy wymiennik ciepła jest woda o lepkości i gęstości odpowiadającej wodzie o temperaturze $T = 25^\circ\text{C}$;
- warunki przepływu są niezmiennie w czasie, przepływ jest ustabilizowany;
- przepływ cieczy jest przepływem turbulentnym;
- modele turbulencji zawierają standardową definicję opisu warstwy przyściennej.

W celu analizy wartości prędkości przepływu w poszczególnych sekcjach wymiennika analizowany model przecięto w trzech miejscach (rys. 2), w górnej części (przekrój 1), części środkowej (przekrój 2) oraz części dolnej (przekrój 3).

Wyniki i dyskusja

Analiza prędkości przepływu na pierwszej płycie

Wyniki obliczeń numerycznych dla przyjętego modelu geometrycznego, w postaci rozkładu pól prędkości na płytach wymiennika ciepła, dla przyjętych warunków początkowych zaprezentowano na poniższych rysunkach.



Rysunek 4. a – Rozkład wektorów prędkości w płytowym wymienniku ciepła, b – Linie prądu

Figure 4. a – Distribution of speed vectors in the plate heat exchanger; b – Current lines

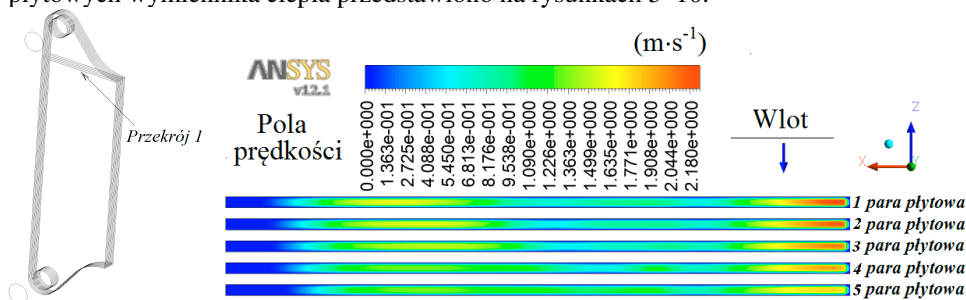
Wyniki obliczeń symulacyjnych przepływu cieczy, w postaci wektorowego rozkładu prędkości (rys. 4a) w całym wymienniku obrazują, że największe prędkości między płytami wymiennika uzyskiwane są w pobliżu otworów doprowadzających i odprowadzających ciecz z wymiennika. Przy założonym początkowym natężeniu przepływu, na rurociągu doprowadzającym ciecz do wymiennika, maksymalna prędkość przepływu w sięga wartości ok. $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. W centralnej części przestrzeni między płytami (na długości wymiennika) prędkość przepływu maleje wraz ze zbliżaniem się do osi symetrii, gdzie osiąga wartości prędkości przepływu bliskie $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Występowanie niskich wartości przepływu obserwuje się również w prawym dolnym narożu płyty. Na podstawie linii prądu określono kierunek i intensywność przepływu płynu w poszczególnych obszarach płyt (rys. 4b). Ich analiza nie wskazuje na występowanie zaburzeń przepływu w postaci zawirowań płynu.

Analizując uzyskane wyniki badań numerycznych pod kątem skuteczności mycia w systemie CIP, można przypuszczać, że najlepiej mytymi obszarami na pojedynczej płycie są miejsca o dużej prędkości przepływu (obszary usytuowane przy wlocie i wylocie),

natomiast najtrudniej myte są miejsca o małych prędkościach przepływu (centralna część płyt oraz jej dolny prawy róg).

Analiza prędkości przepływu w kolejnych przekrojach

Wartości prędkości przepływu w analizowanych trzech przekrojach, dla każdego modelu, są zróżnicowane zarówno na szerokości przestrzeni między płytowej, jak również w przyjętych miejscach próbkowania. Wyniki badań w poszczególnych przecięciach par płytowych wymiennika ciepła przedstawiono na rysunkach 5–10.

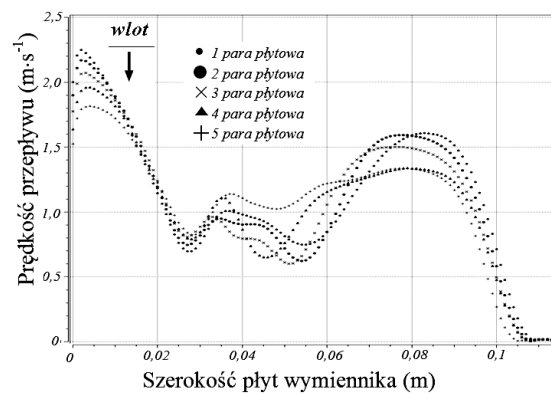


Rysunek 5. Rozkład pól prędkości przepływu w kolejnych parach płytowych wymiennika w przekroju 1

Figure 5. Distribution of the flow speed fields in subsequent plate pairs of the exchanger in cross section 1

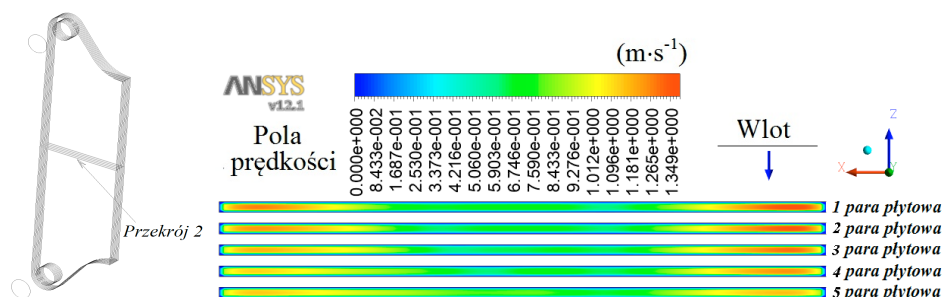
Rysunek 6. Rozkład wartości prędkości przepływu w kolejnych parach płytowych wymiennika w przekroju 1

Figure 6. Distribution of the flow speed values in subsequent plate pairs of the exchanger in cross section 1



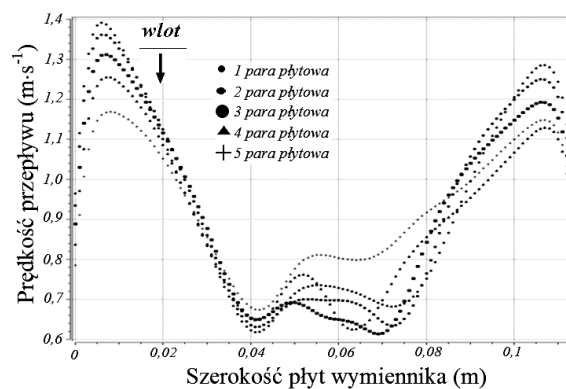
Analiza rozkładu wartości prędkości przepływu w przekroju 1 wskazuje, że najwyższe prędkości przepływu we wszystkich pięciu parach płytowych uzyskiwane są blisko obszaru zasilania (lewy, górny róg płyty). Najwyższe jednak prędkości w tym obszarze obserwuje się na pierwszej parze płytowej, która położona jest najbliżej rurociągu doprowadzającego ciecz do wymiennika. Wraz z oddalaniem się kolejnych par płytowych od pary pierwszej,

wartości prędkości nieznacznie maleją. We wszystkich parach płytowych, w ich środkowych częściach, rozkład prędkości przepływu jest bardzo zmienny. Początkowo wartości prędkości przepływu maleją do wartości ok. $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, następnie wzrastają, nawet do wartości ok. $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, po czym ponownie maleją i ponownie wzrastają, średnio do wartości ok. $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jednak nawet dla najniższych wartości przepływu, które w centralnej części analizowanego obszaru wynoszą $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, liczba Reynoldsa wynosi $Re=2323$, co w dalszym ciągu świadczy o występowaniu burzliwego przepływu. Najmniejsze wartości prędkości przepływu uzyskano po stronie przeciwnej do napływu cieczy na płytę (prawy, górny róg). W tej części wymiennika obserwuje się gwałtowny spadek wartości prędkości przepływu z ok. $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do wartości bliskiej $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Brak przepływu w tych obszarach powoduje, że stają się one najbardziej narażone na niedomocia.



Rysunek 7. Rozkład pól prędkości przepływu w kolejnych parach płytowych wymiennika w przekroju 2

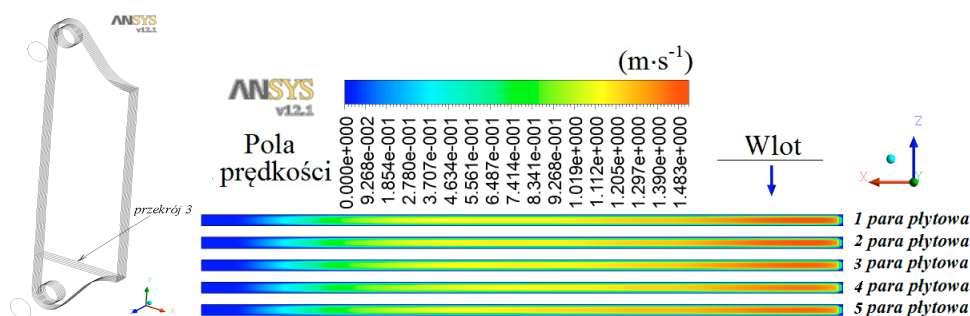
Figure 7. Distribution of the flow speed fields in subsequent plate pairs of the exchanger in cross section 2



Rysunek 8. Rozkład wartości prędkości przepływu w kolejnych parach płytowych wymiennika w przekroju 2

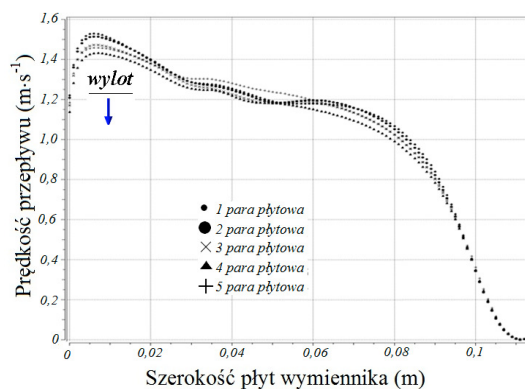
Figure 8. Distribution of the flow speed values in subsequent plate pairs of the exchanger in cross section 2

Rozkłady prędkości w analizowanym przekroju wymiennika, w jego kolejnych parach płytowych, kształtują się podobnie. Najwyższe wartości prędkości przepływu uzyskiwane są w obszarach usytuowanych poniżej napływu cieczy na płyty, a wartości nieco niższe po stronie przeciwnej. W obszarach środkowych prędkość przepływu maleje do wartości ok. $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nie obserwuje się jednak gwałtownego spadku prędkości przepływu przy prawej krawędzi wymiennika, a przepływ w całym analizowanym przekroju jest dość wyrównany. Podobnie jak w obszarze 1, najwyższe prędkości przepływu uzyskano w pierwszej parze płytowej, znajdującej się najbliżej rurociągu doprowadzającego ciecz do wymiennika. Niskie wartości na samych krawędziach układu są wynikiem warunków brzegowych.



Rysunek 9. Rozkład pól prędkości przepływu w kolejnych parach płytowych wymiennika w przekroju 3

Figure 9. Distribution of the flow speed fields in subsequent plate pairs of the exchanger in cross section 3



Rysunek 10. Rozkład wartości prędkości przepływu w kolejnych parach płytowych wymiennika w przekroju 3

Figure 10. Distribution of the flow speed values in subsequent plate pairs of the exchanger in cross section 3

Rozkłady wartości prędkości przepływu w przekroju 3 kształtują się odmiennie od wcześniej analizowanych, jednak w każdej parze płytowej są ze sobą zgodne. Prędkość przepływu na całej szerokości płyt wymiennika wyraźnie spada, uzyskując zerowe wartości prędkości przy prawej krawędzi. Zgodność charakterystyk w tym obszarze wskazuje, że we wszystkich sekcjach wymiennika uzyskiwane są podobne warunki przepływu oraz podobne warunki mycia.

Wnioski

1. Zastosowanie numerycznych symulacji do modelowania zjawisk fizycznych jest dobrym i często stosowanym do obliczeń inżynierskich narzędziem, które daje duże możliwości przewidywania przebiegu danego procesu oraz możliwości projektowania.
2. Wartości prędkości przepływu w analizowanych trzech przekrojach są zróżnicowane zarówno na szerokości przestrzeni między płytowej, jak również w kolejnych parach płytowych wymiennika.
3. Najmniejsze wartości prędkości przepływu w przestrzeni między dwoma płaskimi płytami wymiennika ciepła występują w osi symetrii każdej kolejnej płyty oraz w jej prawym, górnym i dolnym narożu, usytuowanym przeciwległe do otworu odprowadzającego ciecz z przestrzeni między płytowej.
4. Im para płytowa znajduje się dalej od obszaru doprowadzającego ciecz do wymiennika, tym prędkości przepływu są mniejsze.
5. Można przypuszczać, że skuteczność mycia kolejnych płyt wymiennika nie jest jednorodna, ze względu na obserwowane zróżnicowane prędkości przepływu w kolejnych parach płytowych oraz w ich poszczególnych obszarach. Na tej podstawie można przypuszczać, że najlepiej myją się pierwsze płyty w wymienniku, natomiast najgorzej płyty ostatnie.
6. Celowe jest dalsze prowadzenie badań w tym zakresie, uwzględniające ukształtowanie powierzchni płyt oraz mające na celu zasymulowanie warunków przepływu w połączeniu z wymianą ciepła m.in. w całym płytowym wymienniku ciepła, w jego poszczególnych sekcjach. Taka analiza pozwoliłaby w pełnym zakresie wnioskować o występujących zagrożeniach higienicznych w tych aparatach zarówno związanych z powstawaniem zanieczyszczeń, jak i z ich usuwaniem w trakcie procesu mycia w kolejnych sekcjach wymiennika.

Literatura

- Akturk ,F.; Gulben, G.; Aradag, S.; Sezer, N. (2011). Eksperimental investigation of the characteristics of a chevron type gasket pate heat exchanger. *ASME 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey <http://web.firat.edu.tr/iats/cd/subjects/energy/ETE-31.pdf>
- Austin, J.W.; Bergeron, G. (1995). Development of bacterial biofilms in dairy processing plants. *Journal of Dairy Research*, 62, 509-519.
- Blel, W.; Benezech, T.; Legentilhomme, P.; Legrand, J.; Le Gentil-Lelievre, C. (2007). Effect of flow arrangement on the removal of *Bacillus* spores from stainless steel equipment surfaces during a Cleaning In Place procedure. *Chemical Engineering Science*, 62, 3798-3808.
- Elsner, J.W. (1987). *Turbulencja przepływu*. Warszawa, PWN, ISBN 83-01-0613-4.
- Gillham, C.R.; Fryer, P.J.; Hasting, A.P.M.; Wilson, D.I. (2000). Enhanced cleaning of whey protein soils using pulsed flows. *Journal of Food Engineering*, 46, 199-209.
- Grasshoff ,A. (1992). Hygienic design: the basis for computer controlled automation. *Food and Bioproducts Processing. Transactions of The Institution of Chemical Engineers, Part C*, 70, 69-77.
- Gryboś, R.; 1989, *Basic Mechanics of Liquids*, Warszawa, PWN, 83-01-08037-X.

- Islamoglu, Y.; Parmaksizoglu, C. (2003). The effect of channel height on the enhanced heat transfer characteristics in a corrugated heat exchanger channel, *Applied Thermal Engineering*, 23, 979-987.
- Jun, S.; Puri, V.M. (2006). A 2D dynamic model for fouling performance of plate heat exchangers. *Journal of Food Engineering*, 75, 364-374.
- Kazimierski, Z. (2004). *Basic of the mechanics of liquids and the methods of the computer simulation of fluid flows*, Engineering College Łódź. ISBN 83-7283-133-5.
- Lelievre, C.; Legentilhomme, P.; Gaucher, C.; Legrand, J.; Faille, C.; Bénézech, T. (2002a). Cleaning in place: effect of local wall shear stress variation on bacterial removal from stainless steel equipment. *Chemical Engineering Science*, 57(8), 1287-1297.
- Lelievre, C.; Antonini, G.; Faille, C.; Bénézech, T. (2002b). Cleaning-in-place, modelling of cleaning kinetics of pipes soiled by *Bacillus* spores assuming a process combining removal and deposition. *Food and Bioproducts Processing. Transactions of The Institution of Chemical Engineers, Part C*, 80(4), 305-311.
- Lelievre, C.; Legentilhomme, P.; Legrand, J.; Faille, C.; Bénézech, T. (2003). Hygienic design: influence of the local wall shear stress variations on the cleanability of a three-way valve. *Food and Bioproducts Processing. Transactions of The Institution of Chemical Engineers, Part A*, 81, 1071-1076.
- Lozano, A.; Barreras, F.; Fueyo, N.; Santodomingo, S. (2008). The flow in an oil/water plate heat exchanger for the automotive industry. *Applied Thermal Engineering*, 28, 1109-1117.
- Luan, Z. J.; Zhang, G. M.; Tian, M. C.; Fan, M. X. (2008). Flow resistance and heat transfer characteristics of a new-type Plate Heat Exchanger. *Journal of Hydrodynamics*, 20(4), 524-529.
- Materiały informacyjne firmy Alfa Laval. <http://www.alfalaval.com/about-us/our-company/history/Pages/history.aspx>, dostęp 12.02.2011;
- Merheb, B.; Nassar, G.; Nongaillard, B.; Delaplace, G.; Leuliet, J.C. (2007). Design and performance of a low-frequency non-intrusive acoustic technique for monitoring fouling in plate heat exchangers. *Journal of Food Engineering*, 82, 518-527.
- Tsai, Y.C.; Liu, F.B.; Shen, P.T. (2009). Investigations of the pressure drop and flow distribution in a chevron-type plate heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(6), 574-578.
- <http://web.firat.edu.tr/iats/cd/subjects/Energy/ETE-31.pdf>, stan na dzień 25.11.2011r;

NUMERICAL ANALYSIS OF FLUID FLOW BETWEEN THE PLATES OF THE PLATE HEAT EXCHANGER

Abstract. The paper covers analysis of distribution of liquid flow speed in the plate heat exchanger. The research was carried out based on numerical calculations with the finite volume method (FVM) in ANSYS SFX environment, on the basis of which distributions of flow speed were determined in particular plate pairs of the exchanger and curves which picture the flow speed in particular areas of space between plates. An exchanger made of five pairs of plates, which were simplified to flat plates constituted a calculation model. On the basis of the obtained distributions of speed it was found that the lowest values of flow speed in flat plates occur in the symmetry axis of each subsequent plate and in its right and bottom corner located oppositely to the opening, which diverts liquid from the space between plates. The obtained results constitute a part of research concerning identification of production installations spots which are not washed enough during washing in the flow.

Key words: CFD, plate heat exchanger, fluid flow, cleaning in CIP system

Adres do korespondencji:

Joanna Piepiórka-Stepuk; e-mail joanna.piepiorka@tu.koszalin.pl
Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego
Politechnika Koszalińska
ul. Raławicka 15-17
75-620 Koszalin