

Marek JAKUBOWSKI, Mariusz KUBIAK

e-mail: marek.jakubowski@tu.koszalin.pl

Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Wydział Mechaniczny, Politechnika Koszalińska, Koszalin

Analiza symulacyjna przepływu powietrza w komorze wędzarniczej o zmodyfikowanym rozmieszczeniu dysz zasilających

Wstęp

Wędzenie żywności ze względu na charakter i złożoność całego cyklu operacji następujących po sobie jest procesem wieloczynnikowym. Różnorodność technologii i technik wędzenia nadających charakterystycznych walorów sensorycznych, barwy oraz utrwalenia, powoduje poszukiwanie najlepszych rozwiązań, które zagwarantują najwyższą jakość wyrobom gotowym. Zatem każda ze stosowanych metod wędzenia ma istotny wpływ na uzyskanie oczekiwanego efektu końcowego, który uzależniony jest od wielu parametrów, a głównie od rodzaju surowca poddanego wędzeniu, użytego materiału drzewnego do wytworzenia dymu oraz samej konstrukcji komory wędzarniczej, jak i dostosowanie odpowiedniej prędkości przepływu mieszaniny dymu i powietrza w komorze [Dutkiewicz i Stawiany, 2003; Sebastian i in., 2005].

Występujące wady jakościowe wyrobów wędzonych związane są z niedowędzeniem lub przewędzeniem, co związane jest między innymi z nieodpowiednim układem dysz dolotowych i błędnym sterowaniem prędkością przepływu mieszaniny dymno-powietrznej w komorze wędzarniczej. Złożoność zagadnień związanych z występowaniem wad jakościowych wyrobów mięsnych wędzonych dotyczy również nadmiernej kumulacji związków z grupy WWA (wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych). Problem ten w obszarze procesu wędzenia powoduje konieczność prowadzenia prac nad rozwiązaniami, które pozwolą zapewnić standardy wytyczone przez urzędy nadzorujące bezpieczeństwo żywności.

Dym jest złożoną mieszaniną gazowych, ciekłych i stałych bardzo drobnych produktów, otrzymaną w wyniku powolnego spalania materiału drzewnego przy ograniczonym dostępie powietrza. Mimo wielu badań nad wpływem warunków wytwarzania dymu na jego skład nadal nie można precyzyjnie przewidzieć zawartości poszczególnych związków (w tym WWA) w aerozolu wytworzonym z określonego drewna w warunkach przemysłowych. Odzwierciedla się to między innymi w efektywności osiadania na powierzchni i dyfuzji w głąb tkanek surowca wędzonego, związków odpowiadających za cechy sensoryczne, jak i bezpieczeństwo zdrowotne żywności wędzonej.

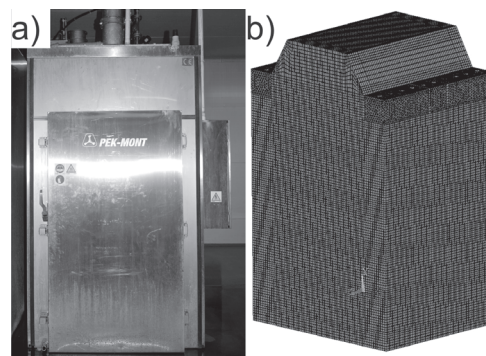
Ciągłe zmiany i poszukiwanie nowatorskich rozwiązań umożliwiających działania zmierzające do optymalizacji procesu technologicznego, jakim jest wędzenie doprowadziły do wykorzystania metod modelowania numerycznego CFD. Umożliwiło to wspomaganie istniejącego procesu technologicznego równoległe z działaniami zmierzającymi do zmian konstrukcyjnych komór pozwalających na optymalizację procesu wędzenia [Kubiak i Jakubowski, 2013].

Celem pracy jest weryfikacja poprawności założeń modyfikacji układu dysz doprowadzających mieszaninę do przestrzeni roboczej komory za pomocą analizy symulacyjnej CFD.

Model symulacyjny

Analizowana była przestrzeń wewnętrzna konstrukcji komory wędzarniczej jednowózkowej typu KWP-1et (Rys. 1a). Komora typu KWP-1et została zaprojektowana i jest wykonywana na potrzeby małych i średnich zakładów przetwórczych. Konstrukcja stanowi optymalne rozwiązanie dla obróbki zróżnicowanych grup produktów mięsnych, których wędzenie wymaga szybkiej zmiany nastaw parametrów procesu [Pek-Mont, 2010]. Komora typu KWP-1et może stanowić konstrukcję bazową dla rozwiązań modułowych o większych pojemnościach roboczych.

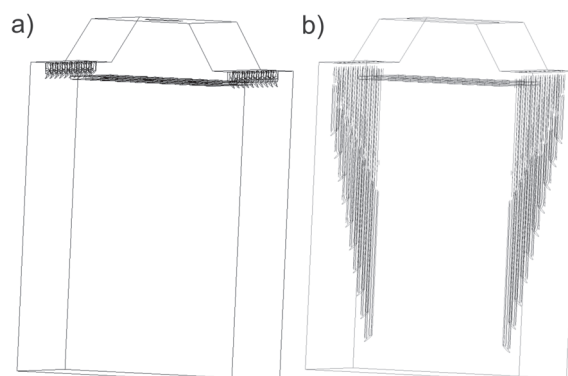
Obiektem symulacyjnym był model przepływu w przestrzeni komory wędzarniczej jednowózkowej. Komora ma następujące wymiary: dłu-



Rys. 1. Komora wędzarnicza jednowózkowa: a) widok frontu komory [Pek-Mont, 2010], b) model geometryczny z siatką FEM [Kubiak i Jakubowski, 2010]

gość – 1440 mm; szerokość – 1200 mm; wysokość – 2950 mm. Wykonano dwa warianty rozmieszczenia dysz, z wykorzystaniem których wprowadza się do komory mieszaninę powietrza i dymu wędzarniczego. Na rys 1b przedstawiono model geometryczny wnętrza komory wyposażonej w klasyczny zestaw dysz zasilających. W ramach modyfikacji konstrukcji zaproponowano alternatywnie zestaw dysz wydłużonych rozmieszczonych przeciwnie. Takie rozmieszczenie zakłada poprawę warunków przepływu dzięki równomierności przepływu.

Do analizy symulacyjnej wybrano dwa warianty komory pustej o rozmieszczeniu dysz właściwym dla przedstawionego modelu oraz w postaci komory pustej o zmodyfikowanych wymiarach dysz. Wydłużenie kolejnych dysz w zestawie po jednej stronie i naprzemienne ich rozmieszczenie ma w intencji autorów poprawić doprowadzenie dymu wędzarniczego do dolnych części przestrzeni roboczej. Należy podkreślić, iż sam kształt geometryczny wnętrza komory zawiera pewne uproszczenia dotyczące pominięcia szczegółów zabudowy wewnętrznej w postaci np. uproszczenia geometrii klap znajdujących się poniżej otworu wylotowego.



Rys. 2. Szkic obrazujący rozkład dysz wlotowych dla komory: a) klasycznej; b) zmodyfikowanej

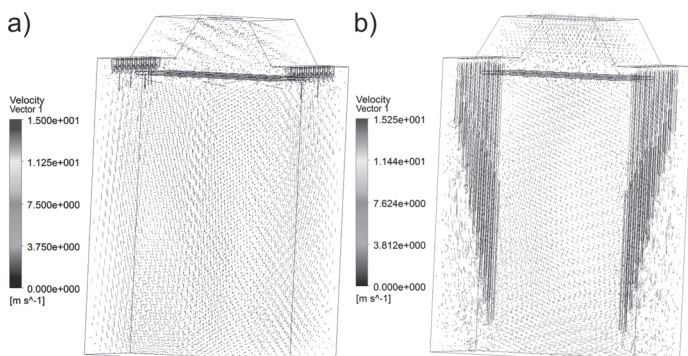
Geometria modelu komputerowego oraz jej dyskretyzacja została wykonana w programie *Mechanical APDL* (dawniej *ANSYS Classic*). Do budowy siatki elementów skończonych wykorzystano dostępny w bibliotece programu element tetragonalny typu *Fluid 142* [Ansys APDL, 2010]. Dla analizowanych wariantów wygenerowano dwie siatki o liczbie elementów wynoszących odpowiednio ok. 1 250 000. Przygotowany model został następnie wprowadzony do preprocesora programu *CFX 12.1*, w którym zadeklarowano warunki brzegowe i początkowe symulacji właściwe dla operacji wędzenia zasadniczego.

Analizowano przepływ jako dwufazowy. Zadeklarowano cząstki dymu o średnicy 0,15 μm oraz nośnik w postaci powietrza. Udział procentowy składników mieszaniny wynosił odpowiednio 64% dymu i 33% powietrza. Prędkość początkowa mieszaniny na końcówkach dysz wlotowych do komory wynosiła 15 m/s. Przepływ w komorze rozpatrywano jako stan ustalony (analiza typu *Steady State*) Przepływ modelowano jako turbulentny stosując model SST. Intensywność turbulencji zadeklarowano na poziomie 1%.

Obliczenia symulacyjne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem modułu *Solver-CFX* z zaimplementowanym kodem CFD pozwalającym na rozwiązanie numeryczne układu równań bilansowych w przestrzeni dyskretnej modelu [*Ansys CFX, 2010*]. Przyjęto kryteria zbieżności ustalając wartości RMS na poziomie $1e^{-5}$ i maksymalną liczbę iteracji wynoszącą 6000. Dodatkowo wprowadzono kryterium wartości różnic reszt na poziomie 0,01. Zbieżność modelu uzyskano po ok. 2500 iteracji. Akwizycję wyników wykonano także w programie CFX, w module postprocesora.

Analiza wyników symulacji

Na podstawie otrzymanych wyników zostały wygenerowane pliki graficzne, na bazie których możliwe było przedstawienie danych w postaci map rozkładu prędkości przepływu w przestrzeniach analizowanych komór. Na rys. 3a przedstawiono rozkład prędkości w komorze wyposażonej w klasyczny zestaw dysz. Dla porównania na rys. 3b zaprezentowano wyniki rozkładu prędkości w komorze wyposażonej w wydłużone dysze.



Rys. 3. Rozkład prędkości przepływu powietrza i dymu wędzarniczego w przestrzeni roboczej komory wędzarniczej jednowózkowej dla: a) klasycznego rozmieszczenia dysz, b) modyfikowanego rozmieszczenia dysz

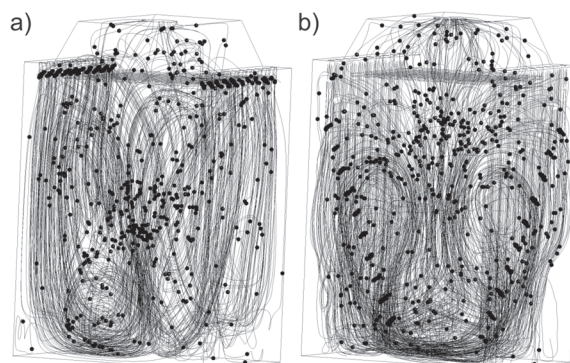
Porównanie rozkładu prędkości przepływu mieszaniny dla obu wariantów rozprowadzenia wykazuje nieznaczne zróżnicowanie rozkładu dla komór pustych. Nie występują aż tak znaczące różnice, jak miało to miejsce podczas porównania rozkładu w komorze pustej i wypełnionej wsadem [*Jakubowski i in., 2011*]. Trudno jednoznacznie określić, czy występuje w obu przypadkach brak symetrii przepływu. Uwydatnia się natomiast spadek wartości prędkości przepływu w dolnej strefie komory, dla przestrzeni w pobliżu podłogi komory, a porównanie obu rozkładów ujawnia także występowanie bardziej równomiernie rozłożonego przepływu w dolnej przestrzeni komory w wariantcie zmodyfikowanym.

W celu lepszego zobrazowania różnic przepływu mieszaniny przeprowadzono także analizę śledzenia (*tracking*) cząstek fazy rozproszonej. Na rys. 4a i 4b przedstawiono torzy ruchu dymu wędzarniczego (w obu analizowanych wariantach konstrukcji dysz rozprowadzających) dla przykładowych 5000 cząstek. W obu modelach przepływu w przestrzeni komory przyjęto założenie, iż cząstki, które zetkną się ze ścianami komory przywierają do ich powierzchni.

Wyniki analizy śledzenia cząstek fazy rozproszonej pozwalają na określenie miejsc koncentracji czynnika wędzacego. Pozwalają wskazać przestrzenie, dla których występować mogą niedostatecznie korzystne warunki propagacji, które decydują o poprawności realizacji operacji wędzenia.

Porównując linie śledzenia cząstek dymu uzyskane dla przepływu w analizowanych komorach widać, że uwydatnia się występowanie (w przypadku drugiego wariantu) przestrzeni przy dnie o korzystniejszych warunkach koncentracji cząstek, co w połączeniu z niższymi

wartościami prędkości stwarza lepsze warunki dla realizacji wędzenia w postaci dłuższego kontaktu dymu z obrabianym surowcem. Podobna sytuacja występuje w pobliżu przestrzeni centralnej w połowie wysokości komory.



Rys. 4. Linie śledzenia cząstek dymu wędzarniczego w przestrzeni roboczej komory wędzarniczej jednowózkowej dla: a) klasycznego rozmieszczenia dysz, b) modyfikowanego rozmieszczenia dysz

Podsumowując wyniki analizy symulacji należy podkreślić, iż opracowany model wymaga weryfikacji eksperymentalnej. Takie prace są aktualnie realizowane z wykorzystaniem zestawu 14 termoanemometrów, które można umiejscowić na pustym wózku wędzarniczym w praktycznie dowolnej konfiguracji np. na ścianie nieopodal dysz wlotowych lub w centralnej strefie przestrzeni roboczej komory. Jedyne ograniczenie metody stanowi możliwość pomiaru wyłącznie jednej składowej prędkości dla pojedynczego pomiaru, co wiąże się z koniecznością powtarzania badań dla każdorazowej zmiany kąta pochylecia otworu w czujniku.

Wnioski

Opracowany model symulacyjny pozwala na analizę przepływu w komorze wędzarniczej.

Jest on narzędziem do prac optymalizacyjnych w zakresie konstrukcji układu dysz do rozprowadzania dymu.

Zaprezentowane warianty modelu symulacyjnego służą optymalizacji, której kryteria zorientowane są na poszukiwanie rozwiązań konstrukcyjnych dla rozmieszczenia i wymiarów dysz umożliwiających korzystniejsze (ujednorodnione) warunki przepływu mieszaniny w komorze wędzarniczej bez względu na kształt geometryczny obrabianego surowca.

LITERATURA

- Ansys APDL, 2010. Dokumentacja programu
 Ansys-CFX, 2010. Dokumentacja programu
 Dutkiewicz D, Stawiany I., 2003. Współczesne wędzarnie i złożoność ich doboru. *Magazyn Przemysłu Rybnego* nr 3(33), 51-54
 Jakubowski M., Kubiak M.S., Diakun J., 2011. Analiza symulacyjna przepływu występującego w wypełnionej wsadem komorze wędzarniczej jednowózkowej, *Inż. Ap. Chem.*, **50**, nr 1, 17-18
 Jakubowski M, Kubiak M.S., 2013. CFD simulations as a supporting tool of process and construction optimization in food industry production practice: The case study of a single truck smoking chamber. *Italian Journal of Food Science (IJFS)*, **25**, nr 3 (w druku)
 Kubiak M.S., Jakubowski M., 2010. Analiza symulacyjna rozkładu prędkości przepływu nośnika dymu w komorze wędzarniczej, *Zesz. Probl. Postępów Nauk Rolniczych*, nr 546, 201-206
 Kubiak M.S., Jakubowski M., 2010. Model symulacyjny warunków przepływu w komorze wędzarniczej. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, nr 1, 55-57
 Pek-Mont Sp. z o.o., 2010. Materiały wewnętrzne
 Sebastian P., Bruneau D., Collignan A. and Rivier M., 2005. Drying and smoking of meat: heat and mass transfer modeling and experimental analysis. *Journal of Food Engineering*, **70**, nr 2, 227-243. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.10.002

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2013 jako projekt rozwojowy nr N R12 0125 10