

Mariusz S. Kubiak, Marek Jakubowski

Politechnika Koszalińska

Włodzimierz Dolata

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

e-mail: mariusz.kubiak@tu.koszalin.pl & marek.jakubowski@tu.koszalin.pl

OPTIMALIZACJA PROCESU I ELEMENTÓW KONSTRUKCJI KOMORY WĘDZARNICZEJ Z WYKORZYSTANIEM INNOWACYJNYCH NARZĘDZI – MODELOWANIA CFD*

Streszczenie: *Computational Fluid Dynamics* (CFD) jako narzędzie w praktyce inżynierskiej stało się integralną częścią konstrukcji (myśli) technicznej i swego rodzaju analizy środowiska w wielu firmach ze względu na zdolność do przewidywania skuteczności nowych wzorów, elementów konstrukcyjnych i procesów, zanim zostaną one kiedykolwiek wyprodukowane i wdrożone. W artykule przedstawiono wykorzystanie narzędzi związanych z modelowaniem CFD w uzyskaniu wstępnych informacji dotyczących przeprowadzanego procesu wędzenia przy zmianie elementów konstrukcji komory wędzarniczej. Zastosowane w pracy modele i wyniki uzyskane podczas analiz symulacyjnych stanowią narzędzie do poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych dysz zasilających w komorze, co zostało osiągnięte. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują na korzystne i bardziej jednorodne warunki przepływu dymu, co zorientowane jest na powtarzalność i jednorodność partii produkcyjnych.

Słowa kluczowe: *Computational Fluid Dynamics* (CFD), modyfikacja dysz, komora wędzarnicza, dym wędzarniczy, przetwórstwo mięsa.

1. Wstęp

Należy zaznaczyć, że przemysł mięsny pod względem różnorodności środków technicznych stosowanych do prowadzenia procesów technologicznych zajmuje jedno z czołowych miejsc w branży spożywczej [Kubiak 2012]. Wyposażenie techniczne w znaczący sposób wpływa na poszczególne procesy i operacje przerobu surowca

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

oraz rzutuje na przebieg czynności i ich organizację, a dalej na jakość uzyskanego wyrobu gotowego. Zatem innowacja jest szczególnym aspektem przedsiębiorczości branży przetwórstwa mięsnego. W tradycyjnym podejściu innowacja jest nową koncepcją produkcyjną, której rezultatem może być ulepszenie techniki, technologii produkcji artykułów spożywczych. Specyfika działań innowacyjnych polega na ich nakierowaniu na układ związany z charakterystykami technicznymi, inżynierskimi i konstruktorskimi. Jednym z takich innowacyjnych narzędzi w praktyce inżynierskiej jest wykorzystanie modelowania CFD, dzięki któremu uzyskuje się wstępne informacje dotyczące przeprowadzanego procesu przepływu strugi, np. mieszaniny powietrza i dymu w komorze wędzarniczej [Pragati, Sharma 2012; Scott, Richardson 1997]. Moduły do modelowania i symulacji wybranych zagadnień z zakresu prowadzenia procesu technologicznego pozwalają na projektowanie m.in. nowych rozwiązań poszczególnych elementów konstrukcyjnych danych urządzeń [Xia, Sun 2002; Sun 2007]. Szczególnie powszechne stają się między innymi dodatkowe moduły do „zgrubnych” obliczeń z wykorzystaniem metod siatkowych (np. FEM – *Finite Element Method*). Istnieją i są nieustannie rozwijane całe pakiety oprogramowania do obliczeń symulacyjnych z wykorzystaniem wielu algorytmów obliczeniowych [Sebastian i in. 2005; Głazunow, Erszow 2006]. Jednym z nich jest wspomniany zestaw narzędzi do analiz CFD o nazwie ANSYS CFX. Jest to program, obok współpracującego z nim (na poziomie post procesora) programu Fluent, będący głównym narzędziem do modelowania i symulacji zagadnień przepływu płynów. Wykorzystanie narzędzi do analizy CFD w przetwórstwie spożywczym i przemysłowym daje wymiar komplementarny i ma przez to wymierny efekt w postaci nowatorskich rozwiązań technicznych i organizacyjnych. Od kilku lat prowadzone są prace zastosowania programu CFX w opracowaniu modeli symulacyjnych CFD przepływu mieszaniny dymu i powietrza w komorze wędzarniczej dla rzeczywistych warunków prowadzonego procesu [Jakubowski i in. 2010]. Geneza zastosowania modelowania w proces wędzenia powstała za przyczyną poszukania rozwiązania problemu występowania wad technologicznych obrabianego surowca mięsnego, takich jak: nierównomierne uwędzenie wsadu surowcowego. Do opracowania modelu geometrycznego komory wykorzystano powszechnie stosowaną w małych zakładach produkcyjnych jednowózkową komorę wędzarniczą (komora produkowana przez firmę PEK-MONT) [Kubiak, Jakubowski 2013; Kubiak, Jakubowski 2010a; 2010b; Kostyra 2005; www.pekmont.pl].

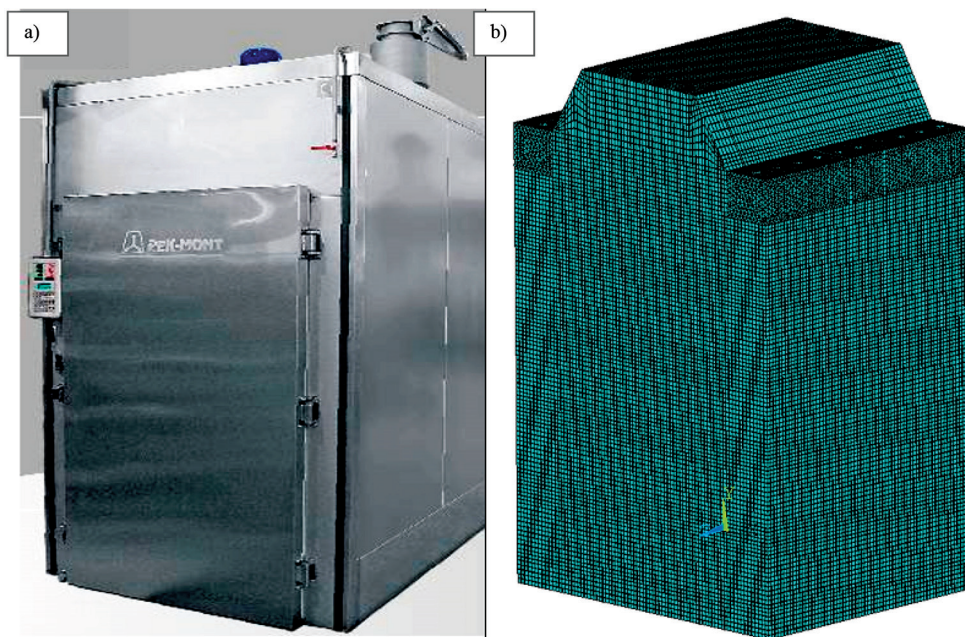
Celem niniejszej pracy jest wskazanie możliwości wykorzystania jednej z wielu metod modelowania numerycznego dla poprawy istniejącego procesu technologicznego przez wskazanie proponowanego rozwiązania konstrukcyjnego dysz zasilających i propagacji mieszaniny dymu.

2. Materiał i metody

Komora typu KWP-1et została zaprojektowana i jest wykonywana na potrzeby małych i średnich zakładów przetwórczych. Konstrukcja komory stanowi optymalne

rozwiązanie dla obróbki zróżnicowanych grup produktów mięsnych, których wędzenie wymaga szybkiej zmiany nastawów parametrów realizacji procesu [www.pekmont.pl; Jakubowski i in. 2011; Kubiak, Jakubowski 2010a; 2010b]. Komora typu KWP-1et może stanowić konstrukcję bazową dla rozwiązań modułowych o większych pojemnościach roboczych 3-, 6- i 8-wózkowych. Wewnętrzne wymiary gabarytowe części roboczej komory są następujące: długość – 1440 mm; szerokość – 1200 mm; wysokość – 2950 mm. Przygotowany do analizy podstawowy model (klasyczny) stanowiła przestrzeń wewnętrzna konstrukcji jednowózkowej komory wędzarniczej typu KWP-1et firmy PEK-MONT (rys. 1a-b).

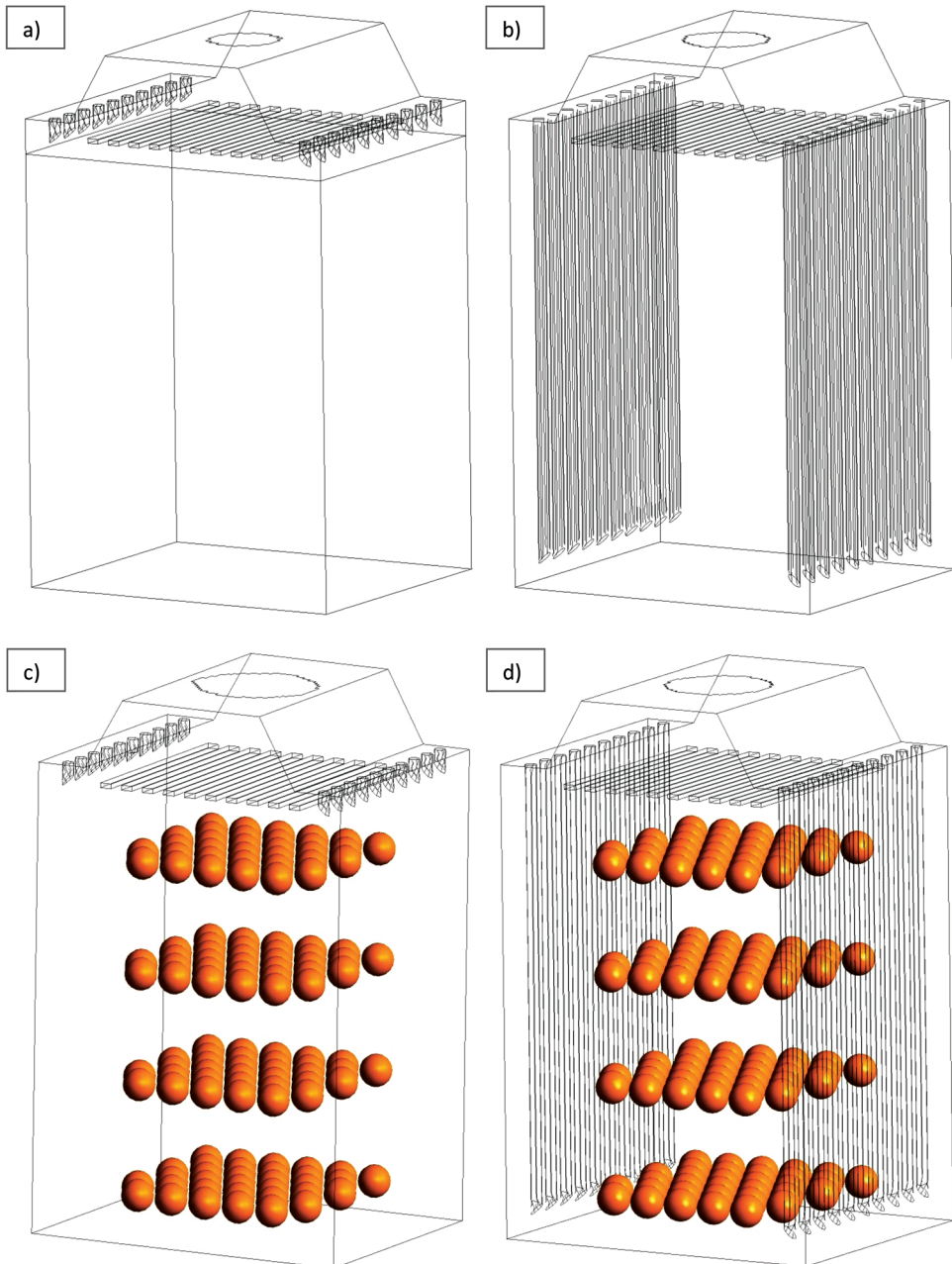
Geometria modelu komputerowego konstrukcji komory pustej oraz jej dyskretyzacja została wykonana w programie ANSYS Mechanical APDL 12.1.



Rys. 1. Komora wędzarnicza jednowózkowa: a) widok ogólny [www.pekmont.pl], b) model geometryczny wnętrza z siatką dyskretyzacyjną

Źródło: opracowanie własne – [Ansys Mechanical 2010].

Na jej podstawie stworzono model o proponowanym rozwiązaniu konstrukcji dysz zasilających i rozpraszających mieszaninę dymu wewnątrz komory wędzarniczej. Geometria modelu komputerowego konstrukcji komory z wsadem oraz jej dyskretyzacja została wykonana w programie ANSYS Mechanical APDL 12.1. Do budowy siatki elementów skończonych wykorzystano dostępny w bibliotece programu element tetragonalny typu Fluid 142 [Ansys Mechanical 2010]. Dla lepszego



Rys. 2. Wygenerowane siatki dla komory bazowej (podstawowej) i zmodyfikowanej konstrukcji dysz zasilających pustych i z wsadem

Źródło: opracowanie własne – [Ansys CFX 2010].

zobrazowania w analizie symulacyjnej wykorzystano geometrię wsadu zbliżonego do wypełnienia w rzeczywistych warunkach: szynki o kształcie kulistym. Wymiary pojedynczej sztuki z partii wsadu odpowiadały średnim wymiarom właściwym dla produktu, jakim była szynka myszka. Geometria i samo rozmieszczenie stanowi pewne uproszczenie związane z założeniem regularnych i jednolitych wymiarów obrabianego wsadu. Wygenerowano siatki dla komory bazowej (podstawowej) i zmodyfikowanej konstrukcji dysz zasilających pustych i z wsadem o liczbie elementów wynoszących odpowiednio ok. 1 250 000 (komory puste) (rys. 2a-b) i ok. 1 500 000 (komory wypełnione wsadem) (rys. 2c-d). Przygotowane modele zostały następnie wprowadzone do preprocesora programu CFX, w którym zadeklarowano warunki brzegowe i początkowe symulacji właściwe dla warunków i parametrów realizacji operacji wędzenia zasadniczego. Następnym elementem prowadzonych analiz symulacyjnych było wprowadzenie gotowych modeli do modułu solvera i uruchomienie symulacji [Ansys CFX 2010].

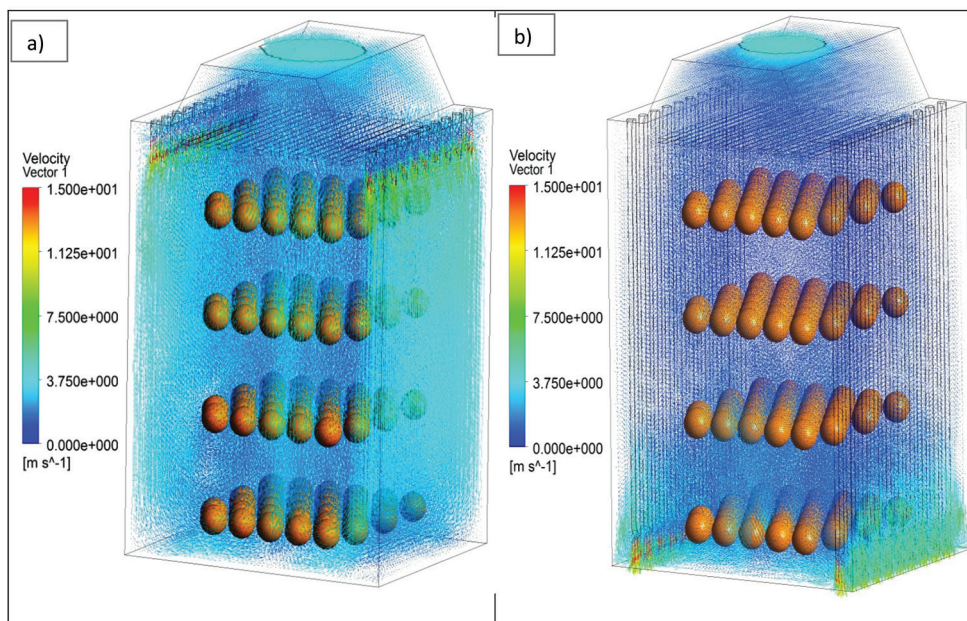
3. Omówienie wyników

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 (klasycznej i z proponowaną modyfikacją) oraz analiza śledzenia (trackingu) cząstek fazy rozproszonej. Mapy rozkładu prędkości umożliwiają obróbkę wartości wynikowych parametrów opisujących przepływ mieszaniny w komorze i ich prezentację w postaci graficznej.

Na rysunku 3 przedstawiono rozkład prędkości w całej przestrzeni wewnętrznej komory wypełnionej wsadem dla wariantu klasycznego (bazowego) i o zmodyfikowanej konstrukcji dysz zasilających. Porównanie rozkładu prędkości przepływu mieszaniny w komorach wędzarniczych w obu wariantach konstrukcyjnych wykazuje się znacznym zróżnicowaniem, co uwydatnia się występowaniem braku symetrii w przepływie pomimo równomiernego rozmieszczenia dysz wlotowych (rys. 3a-b).

Zatem przedstawione mapy prędkości ujawniają występowanie znacznych nierównomierności przepływu w komorze, w której znajdują się przeszkody w postaci poszczególnych sztuk wsadu, co jednoznacznie wskazuje na problem nierównomiernego przepływu mieszaniny dymu, a tym samym na występowanie wad technologicznych, np. niedowędzenia lub przewędzenia.

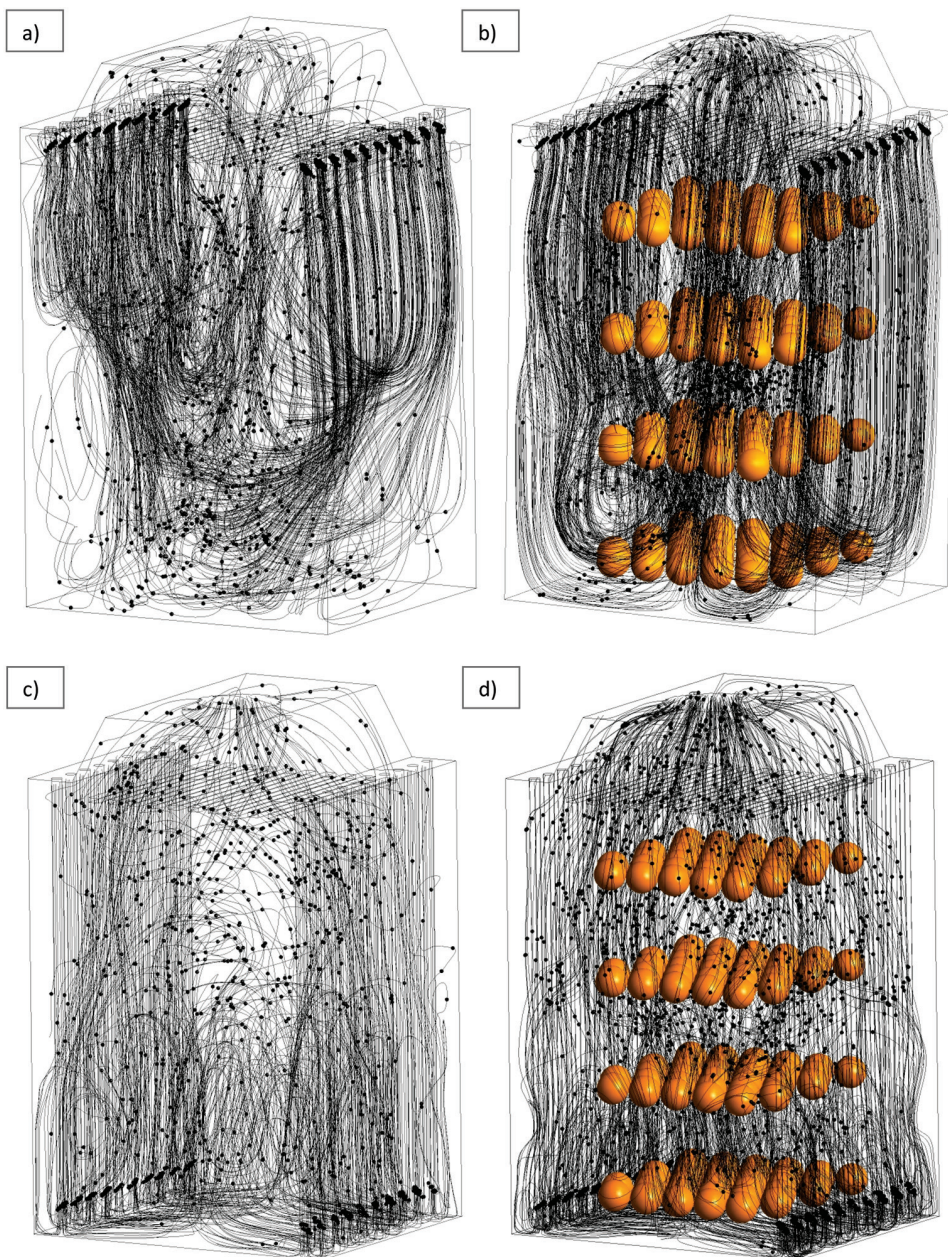
Na rysunku 4a-b i 4c-d przedstawiono tory ruchu dymu wędzarniczego w analizowanym wariantcie konstrukcji dysz rozprzodających, zarówno w pustej, jak i z wsadem, w porównaniu z komorą bazową o klasycznym układzie dysz zasilających. W obu modelach przepływu w przestrzeni komory przyjęto założenie, iż cząstki, które zetkną się ze ścianami komory i wsadem, ulegają „przywieraniu” do ich powierzchni.



Rys. 3. Przestrzenne mapy rozkładu wektorów prędkości przepływu w komorze wędzarniczej jednowózkowej wypełnionej wsadem surowcowym: a) bazowej, b) o zmodyfikowanej konstrukcji dysz zasilających

Źródło: opracowanie własne [Ansys CFX 2010].

Przeprowadzona analiza śledzenia (trackingu) cząstek fazy rozproszonej w celu lepszego zobrazowania różnic przepływu mieszaniny pozwala na określenie miejsc koncentracji czynnika wędzącego. Tym samym pozwala to na wskazanie przestrzeni, dla których występować mogą niedostatecznie korzystne warunki propagacji, które decydują o poprawności realizacji operacji wędzenia. Dokonując porównania wyników śledzenia linii toru cząstek dymu w komorze pustej o wyjściowej (bazowej) i zmodyfikowanej konstrukcji dysz, można stwierdzić występowanie tzw. martwych przestrzeni koncentracji mieszaniny dymu (rys. 4a-c). W komorach o wyjściowej konstrukcji dysz zasilających wypełnionej wsadem (rys. 4b) zjawisko martwych przestrzeni nadal się utrzymuje, co jest potwierdzeniem jednoznacznego wniosku o niedostatecznie korzystnych warunkach propagacji mieszaniny dymu. Również rozmieszczenie linii toru cząstek w wewnętrznych partiach wsadu nie jest korzystne. Zupełnie inaczej wyglądają wyniki dla linii śledzenia (tracking) cząstek dymu w komorach o zmodyfikowanych konstrukcjach dysz zasilających (rys. 4d). Uwydatnia się korzystniejszy przepływ mieszaniny dymu zarówno w dolnej, jak i w środkowej części komory wędzarniczej. Uwzględniając przy tym niższe wartości prędkości przepływu dymu, można w znaczący sposób osiągnąć lepsze warunki dla realizacji



Rys. 4. Tor ruchu cząstek dymu: a) w komórce bazowej (podstawowej) pustej, b) w komórce bazowej (podstawowej) wypełnionej wsadem, c) w komórce o zmodyfikowanym kształcie dysz zasilających pustej, d) w komórce o zmodyfikowanym kształcie dysz zasilających wypełnionej wsadem

Źródło: opracowanie własne [Ansys CFX 2010].

wędzenia w postaci dłuższego kontaktu dymu wędzarniczego z obrabianym surowcem bez względu na jego geometrię (wielkość czy nawet kształt).

4. Podsumowanie

Opracowany model i wyniki uzyskane na podstawie obliczeń stanowią wartościowe narzędzie dla osób zajmujących się praktyką produkcyjną, dotyczy to zarówno technologów pilnujących warunków prawidłowego przebiegu procesu technologicznego, jak i projektantów komór wędzarniczych.

W wyniku zrealizowanych obliczeń otrzymano przestrzenne rozkłady prędkości mieszaniny oraz tory ruchu cząstek (tracking) dymu, na podstawie których przeprowadzono analizę, określając równomierność przepływu mieszaniny wewnątrz komory z uwzględnieniem przestrzeni, w których występują tzw. martwe strefy, w komorach zarówno pustych, jak i wypełnionych wsadem.

Przedstawiony w niniejszej publikacji model symulacyjny ma w założeniu stanowić narzędzie do poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych dysz zasilających w komorze, umożliwiających lepsze (bardziej jednorodne) warunki przepływu mieszaniny bez względu na postać geometryczną obrabianego surowca, co dalej zorientowane jest na jednorodność partii produkcyjnych oraz bezpieczeństwo wyrobów wędzonych.

Podziękowania

Autorzy składają podziękowania firmie PEK-MONT Sp. z o.o. w Bielsku k. Płocka za cenne merytoryczne wskazówki w trakcie opracowywania zagadnienia związanego z możliwością wprowadzania zmian w konstrukcji komór wędzarniczych i zastosowania narzędzi symulacyjnych do ich analizowania.

Literatura

- Ansys CFX 12.1, 2010, dokumentacja programu.
Ansys Mechanical 12.1, 2010, dokumentacja programu.
Głazunow J., Erszow A., *Nieliniowy model matematyczny wędzenia ryb*, 35 Ogólnopolska Konferencja Zastosowań Matematyki, Zakopane, 11-19 września 2006, Warszawa.
Jakubowski M., Kubiak M.S., *Analiza symulacyjna przepływu powietrza w komorze wędzarniczej o zmodyfikowanym rozmieszczeniu dysz zasilających*, Inż. i Aparat. Chem., 2013, 52, 3, s. 183-184.
Jakubowski M., Kubiak M.S., Diakun J., *Analiza symulacyjna przepływu występującego w wypełnionej wsadem komorze wędzarniczej jednowózkowej*, Inż. i Aparat. Chem., 2011, 50(42), 1, s. 17-18.
Kostyra E., *Dym wędzarniczy i preparat dymu wędzarniczego. Skład, właściwości, zastosowanie*, Post. Techn. Przetw. Spoż., 2005, 2, s. 48-50.
Kubiak M.S., *Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne stosowane w komorach wędzarniczo-parzelniczych*, Post. Techn. Przetw. Spoż., 2012, 40, s. 83-86.
Kubiak M.S., Jakubowski M., *Model symulacyjny warunków przepływu w komorze wędzarniczej*, Post. Techn. Przetw. Spoż., 2010a, 1, s. 55-57.

- Kubiak M.S., Jakubowski M. *Trójwymiarowa analiza symulacyjna CFD rozkładu pola prędkości przepływu mieszaniny dwufazowej w komorze wędzarniczej*, Nauka Przyr. Technol., 2010b, 4, 5, s. 1-11.
- Kubiak M.S., Jakubowski M., *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*, Ital. J. Food Sci., 2013, XXV, 3, pp. 251-254.
- Materiały wewnętrzne firmy PEK-MONT Sp. z o.o. (www.pekmont.pl).
- Pragati K., Sharma H.K., *Concept of computational fluid dynamics (cfđ) and its applications in food processing equipment design*, J Food Process Technol., 2012, 3, 1, pp. 1-7.
- Sebastian P., Bruneau D., Collignan A., Rivier M., *Drying and smoking of meat: heat and mass transfer modeling and experimental analysis*, J. Food Eng., 2005, 70 (2), pp. 227-243.
- Scott G.M., Richardson P., *The application of computational fluid dynamics in the food industry*, Trends in Food Science & Technology, 1997, no 8, pp.119-124.
- Scott G.M., *Computational fluid dynamics for the food industry*, Food Technol. Intern. Eur., 1994, pp. 49-51.
- Sun D.W., *Computational fluid dynamics in food processing*, CRC pres. Boca Raton, FL, 2007, pp. 478-505.
- Xia B., Sun D.W., *Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review*, "Computers and Electronics in Agriculture" 2002, 34, pp. 5-24.

OPTIMIZATION OF THE ELEMENTS AND PROCESS OF CONSTRUCTION OF THE SMOKE-DRY CABIN USING THE INNOVATIVE CFD MODELING TOOLS

Summary: Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool in the engineering practice has become an integral part of technical construction (technical thought) as well as a kind of environmental analysis in many companies, because of its ability to foresee the effectiveness of new formulas, construction elements and processes, before they have been discovered and implemented. The article shows the use of tools connected to CDF modeling in order to collect introductory information about the already performed smoke-drying process with a change of construction elements of a smoking chamber. The models used in this paper and the results obtained during the simulation analysis are a valuable tool in search for new constructional solutions for power nozzles in the cabin – which was accomplished. The received results point to a conclusion that it is possible to receive better, more homogenous conditions of flow of the smoke which will be oriented towards of the repeatability of consecutive batch production as well as towards its homogeneity.

Keywords: *Computational Fluid Dynamics* (CDF), nozzles construction modification, smoke chamber, smoke, meat processing.