



COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) INNOWACYJNE NARZĘDZIE DO SYMULOWANIA PROCESU WĘDZENIA ORAZ MODELOWANIA ELEMENTÓW KONSTRUKCJI KOMORY WĘDZARNICZO-PARZELNICZEJ¹

Mariusz S. Kubiak^{a*}, Marek Jakubowski^a, Włodzimierz Dolata^b

^aKatedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Politechnika Koszalińska

^bZakład Inżynierii i Projektowania Procesów Produkcyjnych, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

* Adres do korespondencji: ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, e-mail: mariusz.kubiak@tu.koszalin.pl

INFORMACJE O ARTYKULE

Historia artykułu:

Wpłynął: październik 2013

Zrecenzowany: grudzień 2013

Zaakceptowany: luty 2014

Słowa kluczowe:

Computational Fluid Dynamics (CFD)

model symulacyjny

komora wędzarnicza

proces wędzenia

konstrukcja dysz zasilających

STRESZCZENIE

Omówiono Computational Fluid Dynamics (CFD) w praktyce inżynierskiej jako integralną część postępu w całej inżynierii procesowej wędzenia z uwzględnieniem rozwoju technik i metod przeprowadzania obróbki wędzarniczej. Wykorzystanie narzędzi związanych z modelowaniem CFD pozwoliło na uzyskanie istotnych informacji dotyczących przeprowadzanego procesu wędzenia dla asortymentu o kształcie geometrycznym zbliżonym do szynki (myszka). Komora jednowózkowa stanowiła konstrukcję bazową dla rozwiązań proponowanej modyfikacji elementów zasilających (dysz), jak również geometrię modelu komputerowego samej konstrukcji komory pustej i z wsadem. Dyskretyzacja została wykonana w programie ANSYS Mechanical APDL 12.1 i na jej podstawie stworzono model o proponowanym rozwiązaniu konstrukcji dysz zasilających i rozprowadzających mieszaninę dymu wewnątrz komory wędzarniczej. Na podstawie modeli symulacyjnych i uzyskanych z nich wyników można jednoznacznie stwierdzić, że osiągnięto korzystniejsze warunki rozprowadzenia mieszaniny dymu w komorze wędzarniczej. Przeprowadzone w warunkach rzeczywistych badania z wykorzystaniem zmodyfikowanych dysz zasilających w porównaniu z klasycznym układem potwierdzają zależności uzyskane z symulacji.

Wstęp

Celem procesu wędzenia w aspekcie technologicznym jest utrwalenie i nadanie wędzonym produktom wysoce specyficznych cech sensorycznych i usunięcie części wody oraz działanie antybakteryjne wytwarzanych składników dymu, przede wszystkim fenoli (Sikor-

¹ Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2013 jako projekt rozwojowy nr NR12 0125 10

ski i Kołakowski, 2010). Ogólnikowość definicji nie odzwierciedla jednak skomplikowanej i zróżnicowanej technologii wędzenia. Sam proces wędzenia uzależniony jest od wielu czynników, np.: składu dymu (gatunek drewna i jego postać użyta do wytwarzania dymu, sposobu i szybkości spalania drewna), temperatury, wilgotności i gęstości wytworzonego dymu (Tóth i Potthast, 1984; Bratzler i in., 1969) oraz pośrednio od prędkości i sposobu podawania, jak i przepływu (rozprowadzenia) mieszaniny dymu wędzarniczego wewnątrz komory, a także konstrukcji i rozkładu dysz zasilających (Sikorski i Kołakowski, 2010; Kubiak i Jakubowski, 2010a, 2013).

Zwiększająca się świadomość ludzi w zakresie ekologii i zdrowia przyczyniła się do postępu w całej technologii wędzenia z uwzględnieniem rozwoju technik i metod przeprowadzania obróbki wędzarniczej. Współczesna praktyka produkcyjna bez względu na branżę przetwórstwa ukierunkowana jest na poszukiwanie rozwiązań umożliwiających redukcję kosztów przy jednoczesnym zachowaniu reżimu technologicznego (Kubiak, 2012). Wraz z upływem czasu i ze zmianami kulturowymi oraz z postępem myśli technicznej, wędzenie stało się dopracowanym procesem, przyjmując postać nowej generacji (Wilms, 2000; Kubiak, 2012). Uwydatniła się również na szerszą skalę konieczność sprostania rosnącym wymaganiom jakościowym, w tym przede wszystkim zdrowotnym, przy zachowaniu tradycyjnego charakteru produktu wędzonego (Sikorski i Kołakowski, 2010; Kubiak i Jakubowski, 2013).

Podczas wędzenia cząstki dymu znajdują się w ciągłym ruchu pod wpływem oddziaływań sił dyfuzyjnych (ruchy Browna), grawitacyjnych, konwekcyjnych, odśrodkowych, elektrostatycznych itp. Szczególnie dużą rolę podczas procesu wędzenia odgrywają ruchy Browna, które są główną przyczyną koalescencji, koagulacji i osadzania cząstek dymu na produkcie. Przybliżona średnica pojedynczej cząstki dymu wynosi 0,08-0,15 μm , a gęstość mieszaniny dymu i nośnika (powietrza) waha się w granicach 0,02-1,30 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Šimko, 2009; Sikorski i Kołakowski, 2010; Sikorski, 2004). Odpowiednie ustawienie dysz i wymuszenie kierunku propagacji mieszaniny dymu pozwala osiągnąć ujednolicenie partii produkcyjnej, jak również ograniczenie zanieczyszczeń wynikających z przeprowadzanego procesu utrwalania.

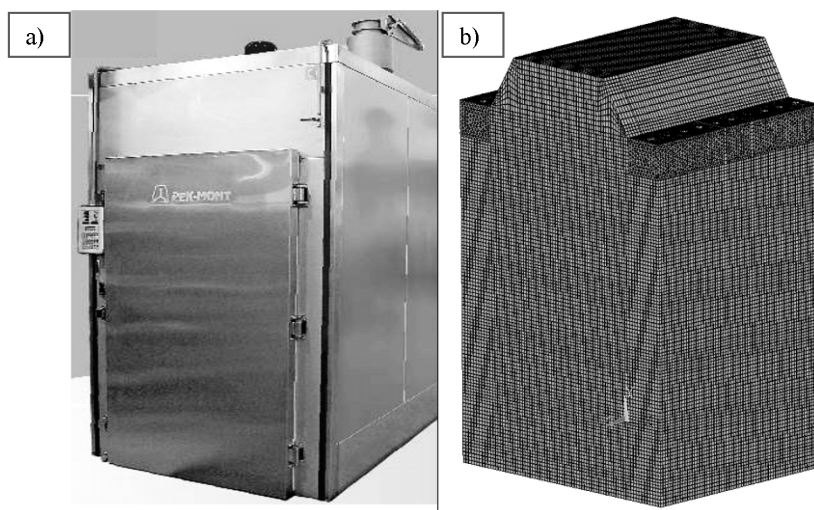
Cel pracy

Celem badań było wykorzystanie jednej z wielu metod modelowania numerycznego (CFD) do uzyskania informacji związanych z poprawą przeprowadzanego procesu wędzenia przez polepszenie propagacji mieszaniny dymu wewnątrz komory, uwzględniając kształt geometryczny wsadu.

Materiał i metody

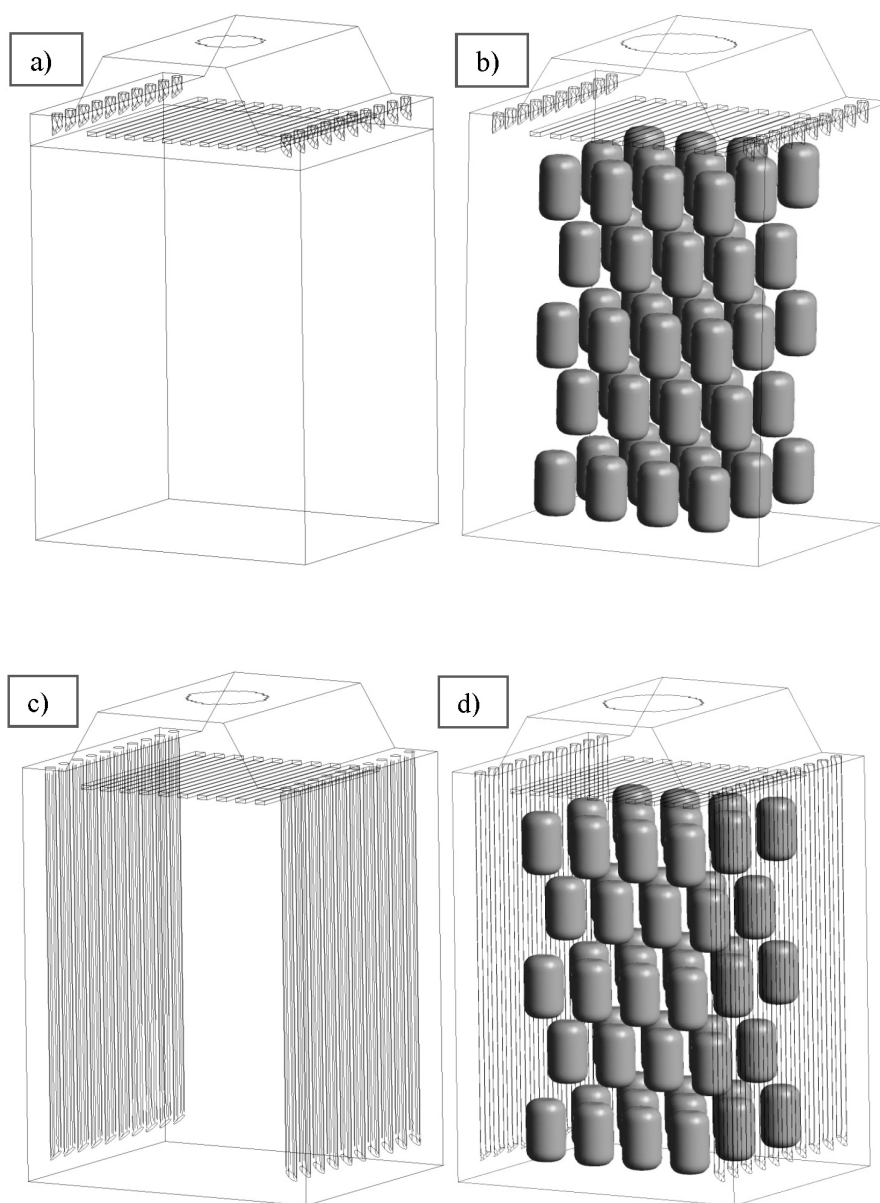
Obiektem badawczym była komora jednowózkowa typu KWP-1et firmy Pek-Mont Sp. z o.o. (rys. 1a, b) o wewnętrznych wymiarach gabarytowych części roboczej: długość – 1440 mm; szerokość – 1200 mm; wysokość – 2950 mm. Wybór obiektu badawczego podyktowany był wykorzystywaniem tego rodzaju komór w małych i średnich zakładach,

gdzie produkcja ukierunkowana jest na zróżnicowane grupy produktów mięsnych, których wędzenie wymaga szybkiej zmiany parametrów realizacji procesu (PEK-MONT, 2010; Kubiak i Jakubowski, 2010a, 2010b).



Rysunek 1. Komora wędzarnicza jednowózkowa firmy Pek-Mont Sp. z o.o.: a – widok ogólny (www.pekmont.pl), b – model geometryczny wnętrza z siatką dyskretizacyjną
Figure 1. One-trolley smoke and cooking chamber of Pek-Mont Sp. z o.o. company: a – general view (www.pekmont.pl), b – geometrical model of the inside with a discretization grid

Na podstawie danych rzeczywistych przygotowano model podstawowy (klasyczny) przestrzeni wewnętrznej komory. Cała geometria modelu komputerowego konstrukcji komory pustej (o klasycznym układzie dysz i zmodyfikowanym) oraz jej dyskretyzacja została wykonana w programie ANSYS Mechanical APDL 12.1 (ANSYS Mechanical, 2010). Przy budowie siatki elementów skończonych wykorzystano dostępny w bibliotece programu element tetragonalny typu Fluid 142 (ANSYS Mechanical, 2010). W analizie symulacyjnej wykorzystano geometrię wsadu zbliżoną do wypełnienia w rzeczywistych warunkach: produkt o kształcie owalnym. Wymiary pojedynczej sztuki z partii wsadu odpowiadały średnim wymiarom właściwym dla produktu. Wykorzystana geometria i samo rozmieszczenie stanowi w symulacji pewne uproszczenie związane z założeniem regularnych i jednolitych wymiarów obrabianego wsadu. Wygenerowane siatki dla bazowej (klasycznego układu dysz zasilających) i proponowanego rozwiązania (zmodyfikowanej konstrukcji dysz zasilających: dysze długie do 15 cm od podłogi) dla komory pustej i z wsadem mieściły się w liczbie elementów wynoszących odpowiednio ok. 1 250 000 – komory puste (rysunek 2a-c) i ok. 1 500 000 – komory wypełnione wsadem (rysunek 2b-d).



Rysunek 2. Wygenerowane siatki dla komory pustej i z wsadem: a,b – bazowej (klasycznej) i c,d – zmodyfikowanej konstrukcji dysz zasilających
 Figure 2. Generation of the grid for empty chamber and with a batch: a,b – base (classic) and c,d – modified structure of supplying nozzles

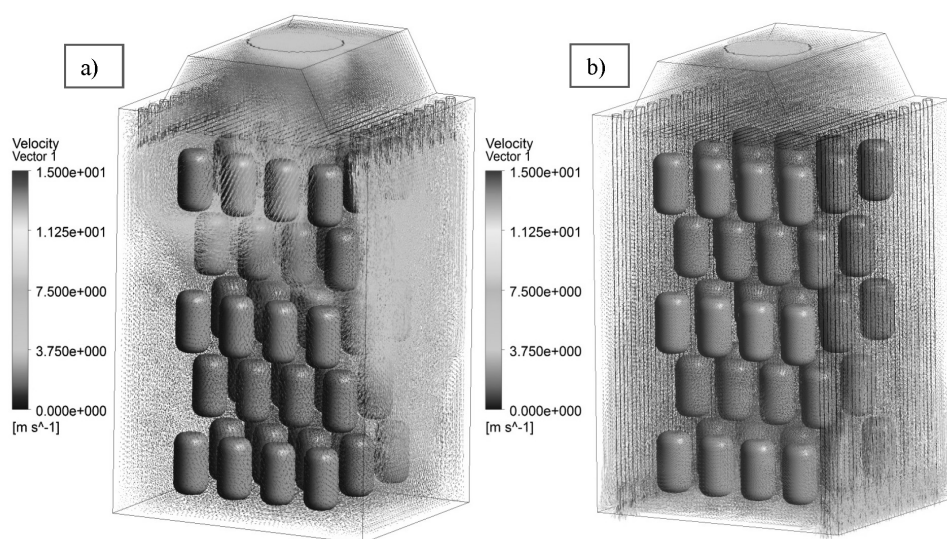
Tak przygotowane modele zostały następnie wprowadzone do preprocesora programu CFX, w którym zadeklarowane zostały warunki brzegowe i początkowe symulacji właściwe dla przeprowadzanych warunków i parametrów operacji wędzenia zasadniczego. Następnym elementem prowadzonych analiz symulacyjnych było wprowadzenie gotowych modeli do modułu solvera i uruchomienie symulacji (ANSYS CFX, 2010).

W pracy określenie „przepływ mieszaniny dymu” wewnątrz komory wędzarniczej będzie stosowane zamiennie z określeniem „ruch”, „propagacja”, co jest podyktowane definiowaniem wg fachowej literatury.

Wyniki badań

Wygenerowane pliki graficzne siatek elementów skończonych umożliwiły przedstawienie danych w postaci map rozkładu prędkości przepływu (ruchu) w przestrzeniach analizowanych komór (klasycznej i z proponowaną modyfikacją) oraz analizę śledzenia (trackingu) cząstek fazy rozproszonej. Prezentacja w postaci graficznej map rozkładu prędkości umożliwiła obróbkę wartości wynikowych parametrów opisujących przepływ mieszaniny w komorze.

Rozkład prędkości w całej przestrzeni wewnętrznej komory wypełnionej wsadem dla wariantu klasycznego (bazowego) i o zmodyfikowanej konstrukcji dysz zasilających przedstawiony został na rysunku 3.



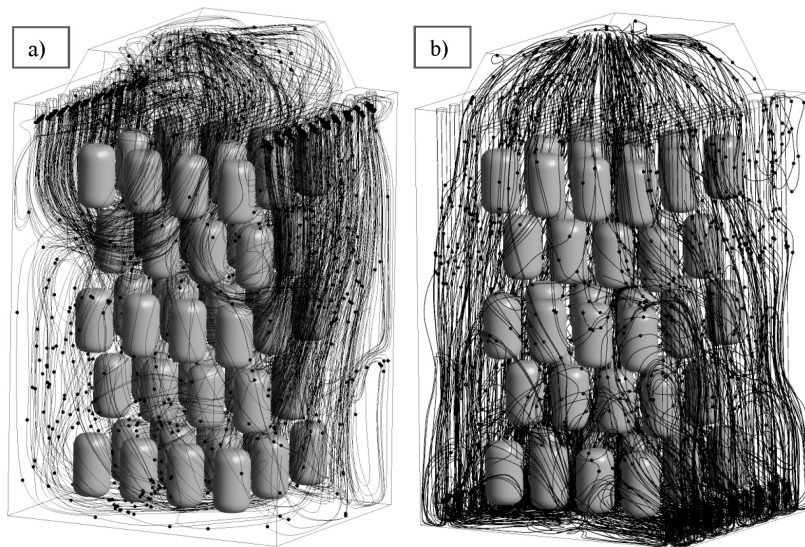
Rysunek 3. Przestrzenne mapy rozkładu wektorów prędkości przepływu (ruchu) w komorze wędzarniczej jednowózkowej wypełnionej wsadem: a – bazowej (klasycznej), b – o zmodyfikowanej konstrukcji dysz zasilających

Figure 3. Space maps of the distribution of vectors of flow speed (movement) in the smoke one-trolley chamber with a batch: a – base (classic), b – of modified structure of supplying nozzles

Porównane rozkłady prędkości przepływu mieszaniny w komorach wędzarniczych w obu wariantach konstrukcyjnych wykazały znaczne zróżnicowanie, co wskazało na występowanie braku symetrii w przepływie pomimo równomiernego rozmieszczenia dysz wlotowych (rysunek 3a-b).

Z przedstawionych map prędkości (rys. 3a) można zauważyć występowanie znacznych nierównomierności przepływu mieszaniny dymu w całej przestrzeni komory wypełnionej wsadem. Znajdujące się przeszkody w postaci poszczególnych sztuk wsadu jednoznacznie wskazują na problem nierównomiernej propagacji mieszaniny dymu, a tym samym możliwość występowania wad technologicznych, np. niedowędzenia lub przewędzenia przy klasycznym układzie dysz zasilających. Na rysunku 3b, gdzie zostało zaproponowane rozwiązanie wydłużenia dysz zasilających w mieszaninę dymu, prędkość oraz związana z tym propagacja jest o wiele bardziej równomierna.

Przeprowadzona analiza śledzenia (trackingu) cząstek fazy rozproszonej w celu lepszego zobrazowania różnic przepływu mieszaniny dymu, pozwala na określenie miejsc koncentracji czynnika wędzącego. Pozwala to na wskazanie przestrzeni, dla których występować mogą niedostatecznie warunki propagacji, które decydują o braku poprawności realizacji procesu wędzenia. Na rysunkach 4a-b przedstawiony został tor ruchu dymu wędzarniczego w analizowanych wariantach konstrukcji dysz rozprowadzających czynnik w postaci mieszaniny dymu. Dla obu modeli przyjęto założenie, iż cząstki dymu, które zetkną się ze ścianami komory oraz wsadem, ulegają „przywieraniu” do ich powierzchni.



Rysunek 4. Tor ruchu (tracking) cząstek dymu w komorze wędzarniczej jednowózkowej wypełnionej wsadem: a – bazowej (klasycznej), b – o zmodyfikowanym kształcie dysz zasilających

Figure 4. Tracking of smoke particles in the smoke one-trolley chamber with a batch: a – base (classic), b – of modified shape of supplying nozzles

Porównując wyniki śledzenia linii toru cząstek dymu w komorze o klasycznej (bazowej) konstrukcji dysz zasilających z wsadem można stwierdzić występowanie tzw. „martwych przestrzeni” koncentracji mieszaniny dymu (rys. 4a). Występujące „martwe przestrzenie” (strefy) są potwierdzeniem tezy o niekorzystnych warunkach propagacji mieszaniny dymu w takim układzie dysz zasilających, co może przekładać się w dalszej kolejności na gotowy produkt. Odmienną sytuację można zaobserwować w komorze, gdzie zostały zaproponowane zmodyfikowane dysze zasilające (ich długość do 15 cm od podłogi). W proponowanym układzie dysz zasilających uwydatnia się korzystniejszy ruch mieszaniny dymu zarówno w dolnej, jak i w środkowej części komory wędzarniczej, co poprawia koncentrację i warunki propagacji dymu wędzarniczego. Uwzględniając przy tym niższe wartości prędkości przepływu dymu zarówno w warunkach symulacyjnych, jak i w rzeczywistych, można w znaczący sposób osiągnąć lepsze warunki dla realizacji wędzenia w postaci dłuższego kontaktu dymu wędzarniczego z obrabianym surowcem (bez względu na jego geometrię wielkość czy nawet kształt).

Wnioski

1. Opracowany i testowany model oraz wyniki uzyskane na podstawie obliczeń, stanowią wartościowe narzędzie dla osób zajmujących się w praktyce produkcyjnej procesem wędzenia, dotyczy to zarówno technologów pilnujących warunków prawidłowego przebiegu procesu technologicznego, jak również projektantów komór wędzarniczych do poszukiwania nowych rozwiązań w optymalizacji złożonego procesu wędzenia.
2. Testowany model wykazał się stabilnością, co pozwala, po rozszerzeniu możliwości obliczeniowych stacji roboczej, na zadeklarowanie przepływu wielofazowego oraz uwzględnienie dodatkowych czynników, które wpływają na proces wędzenia.
3. Istnieje również możliwość zmiany w modelu geometrii wsadu, modyfikacji układu dysz, co pozwala na analizy symulacyjne dla różnych wariantów wypełnienia komory.
4. Przedstawiony model symulacyjny ma w założeniu stanowić narzędzie do poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych dysz zasilających w komorze wędzarniczej oraz innych elementów konstrukcyjnych wpływających na polepszenie warunków wędzenia.

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. Podziękowania autorzy składają również dla Zakładu Przetwórstwa Mięsnego I.Z Grabowscy S. J., gdzie dokonywane były badania w warunkach rzeczywistych, przemysłowych pozwalające na weryfikację wyników z analiz symulacyjnych.

Literatura

- Ansys CFX 12.1 (2010). Dokumentacja programu.
- Ansys Mechanical 12.1 (2010). Dokumentacja programu.
- Bratzler, L.J.; Spooner, M.E.; Weatherspoon, J.B.; Maxey, J.A. (1969). Smoke flavor as related to phenol, carbonyl and acid content of bologna. *Journal of Food Science*, 34, 144-148.
- Jakubowski, M.; Kubiak, M.S. (2013). Analiza symulacyjna przepływu powietrza w komorze wędzarniczej o zmodyfikowanym rozmieszczeniu dysz zasilających. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 52(3), 183-184.
- Kubiak, M.S. (2012). Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne stosowane w komorach wędzarniczo-parzelniczych. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 40, 83-86.
- Kubiak, M.S.; Jakubowski, M. (2010a). Model symulacyjny warunków przepływu w komorze wędzarniczej. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 55-57.
- Kubiak, M.S.; Jakubowski, M. (2010b). Trójwymiarowa analiza symulacyjna CFD rozkładu pola prędkości przepływu mieszaniny dwufazowej w komorze wędzarniczej. *Nauka Przyroda Technologie*, 4(5), 1-11.
- Kubiak, M.S.; Jakubowski, M. (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 Food Science*, 25(3), 251-254.
- PEK-MONT Sp. z o.o. (2010). Materiały wewnętrzne firmy (www.pekmont.pl).
- Sikorski, Z. E.; Kołakowski, E. (2010). Smoking, in *Handbook of Meat Processing* (Ed Toldrá F.), Chapter 12. Wiley-Blackwell, Oxford, UK, 231-245.
- Sikorski, Z.E. (2004). Traditional smoking. in. *Encyclopedia of meat sciences*, Jensen W.K., Devine, C.; Dikeman, K. (Eds.), (1265-1277). London: Elsevier.
- Šimko, P. (2009). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Smoked Meats. *Safety of Meat and Processed Meat Food Microbiology and Food Safety*, (Ed Toldrá F.), (343-363). chapter 13. Springer Science, Business Media, LLC.
- Tóth, L.; Potthast, K. (1984). Chemical Aspects of the Smoking of Meat and Meat Products. *Advances in Food Research*, 29, 87-158.
- Wilms, M. (2000). The developing of modern smokehouses – Ecological and economical aspects. *Fleischwirtschaft International*, 4, 8-13.

**COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS CFD AS AN INNOVATIVE
TOOL FOR STIMULATING THE SMOKE DRYING PROCESS
AND FOR MODELING THE CONSTRUCTION ELEMENTS
OF A SMOKE-DRYING CHAMBER**

Abstract. This paper elaborates upon the use of Computational Fluid Dynamics (CFD) tools in the engineering practice as an integral part of progress of the chemical engineering of smoke-drying taking into consideration the technical progress and smoke-drying methods. The use of tools connected to CDF modeling allowed collecting crucial information concerning the performed process of smoke-drying for the assortment geometrically shaped similarly to a piece of oval ham. A single truck chamber was a base construction for solutions of the suggested modification of the powering elements (nozzles) as well as for the computer model geometry of the construction of an empty chamber and a full chamber itself. Discretization has been made in the ANSYS Mechanical APDL 12.1 software and on this basis a model of the suggested solution for construction of power nozzles as well as nozzles spreading the smoke substance inside the smoking chamber has been prepared. On the basis of simulating models and received feedback we can unequivocally say, that more advantageous conditions of spreading the smoke substance in the smoking chamber had been found. The tests performed in the real conditions with the use of modified power nozzles in comparison to the classical arrangement confirm dependences obtained during simulation.

Key words: Computational Fluid Dynamics (CFD), simulation model, smoking chamber, smoke-drying process, power nozzles construction