

Marek JAKUBOWSKI, Mariusz S. KUBIAK, Jarosław DIAKUN

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

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

## Analiza symulacyjna przepływu występującego w wypełnionej wsadem komorze wędzarniczej jednowózkowej

### Wstęp

Najczęściej stosowanym rodzajem obróbki termicznej dla wyrobów mięsnych jest wędzenie, parzenie lub pieczenie. Wędzenie stanowi najstarszy i szeroko stosowany sposób utrwalania oraz nadawania charakterystycznego smaku wyrobom mięsnym [1–4].

Istotą operacji jest nasycenie mięsa składnikami dymu otrzymanego w wyniku pirolizy twardego drewna (np. buk, dąb i inne) przy ograniczonym dostępie powietrza, usunięciu części wody i wywołania zmian sieciowania molekuł białka przez aldehydy, a przede wszystkim formaldehydy [1, 5]. Składniki dymu wnikają lub osiadają na powierzchni wędzonej żywności spowalniając utlenianie tłuszczów, wchodząc w jej skład oraz hamując rozwój mikroflory [6–8]. Absorpcja składników dymu na powierzchni i wewnątrz obrabianego produktu oznacza przejście komponentów dymu z fazy rozproszonej do ciekłej bezpośrednio w produkcie (woda i/lub tłuszcz). Połowę składników dymu wędzarniczego stanowią aldehydy i fenole, które przyczyniają się istotnie do powstania typowej barwy mięsa wędzonego.

Układ aerolowy, jakim jest dym podlega szybkim przemianom głównie ze względu na przechodzenie składników z fazy rozpraszającej do rozproszonej i na odwrót oraz ze względu na polimeryzację składników, ponieważ zdolność wędzenia mają głównie składniki fazy rozpraszającej dymu, a kondensacja składników obniża skuteczność procesu. Cząstki dymu o średnicy ok.  $0,15 \mu\text{m}$ , znajdują się w ciągłym ruchu pod wpływem oddziaływań sił dyfuzyjnych, grawitacyjnych, konwekcyjnych, odśrodkowych, elektrostatycznych, itp. Po zakończonej operacji wędzenia w produktach wędzonych mogą występować wady związane głównie z niedowędzeniem lub z przewędzeniem, co jest przyczyną doboru niewłaściwych parametrów realizacji operacji. W wielu zakładach przetwórstwa mięsnego problem występowania wad niedowędzenia eliminuje się poprzez przeprowadzenie powtórnej operacji wędzenia. Natomiast wady związane z przewędzeniem eliminuje się przez zwiększenie dostępu powietrza i rozrzedzeniu dymu w trakcie prowadzonego procesu wędzenia. Obydwa sposoby związane są jednak ze zwiększeniem kosztów produkcyjnych, jak również mogą wpływać na pogorszenie jakości gotowych wyrobów wędzonych.

Problemy związane z prawidłową realizacją wędzenia stały się podstawą opracowania modeli symulacyjnych CFD przepływu wielofazowego mieszaniny dymu i powietrza w komorze wędzarniczej. Jako bazową konstrukcję przyjęto model geometryczny komory jednowózkowej stanowiącej podzespół bazowy zagregowanych rozwiązań wielokomorowych szaf wędzarniczych o większych pojemnościach roboczych.

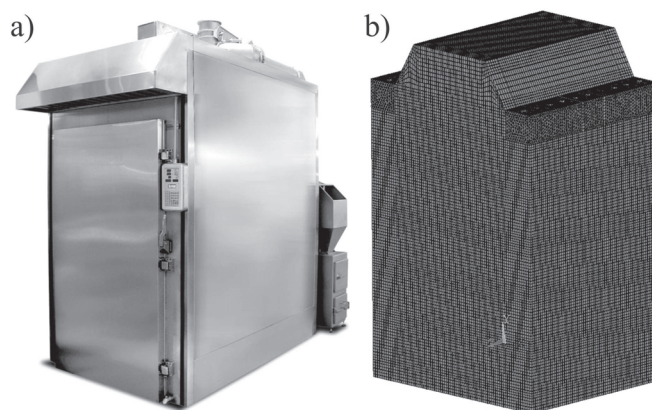
### Model symulacyjny

Model symulacyjny stanowi geometria konstrukcji komory wędzarniczej jednowózkowej typu KWP-1et (Rys. 1a). Wymiary wewnętrzne komory wynoszą: długość – 1440 mm; szerokość – 1200 mm; wysokość – 2950 mm. Komory te zostały zaprojektowane, i są wykonywane dla małych i średnich zakładach przetwórczych. Stanowią one optymalne rozwiązanie dla obróbki zróżnicowanych grup produktów mięsnych, których wędzenie wymaga szybkiej zmiany nastawów parametrów realizacji procesu [5].

Do analizy symulacyjnej wybrano dwa warianty w postaci komory pustej oraz wypełnionej wsadem o geometrii zbliżonej do wypełnienia szynkami o kształcie kulistym. Średnica pojedynczej szynki wynosi 160 mm. Wymiary i rozmieszczenie odwzorowania stanowi przybliżenie rzeczywistej geometrii 198 szynki zawieszonych w sześciu rzędach

i obrabianych w jednym cyklu operacji wędzenia właściwego. Należy jednak podkreślić, iż geometria i rozmieszczenie wsadu stanowi pewne uproszczenie związane z regularnością i jednolitymi wymiarami szynki.

Geometria modelu komputerowego oraz jej dyskretyzacja została wykonana w programie *ANSYS 12.1* (rys. 1b). Do budowy siatki elementów skończonych wykorzystano dostępny w bibliotece programu element tetragonalny typu *Fluid 142* [9]. Wygenerowano dwie siatki o liczbie elementów wynoszących odpowiednio ok. 1 250 000 (komora pusta) i ok. 1 500 000 (komora wypełniona wsadem). Przygotowany model został następnie wprowadzony do preprocesora programu *CFX 12.1*, w którym zadeklarowano warunki brzegowe i początkowe symulacji właściwe dla operacji wędzenia zasadniczego.



Rys. 1. Komora wędzarnicza jednowózkowa: a) widok ogólny [5], b) model geometryczny wnętrza z siatką dyskretyzacyjną

Przepływ rozpatrywano jako dwufazowy. Zadeklarowano cząstki dymu o średnicy  $0,15 \mu\text{m}$  oraz nośnik w postaci powietrza. Udział procentowy składników mieszaniny wynosił odpowiednio 64% dymu i 33% powietrza. Prędkość początkowa mieszaniny na wlotach 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%.

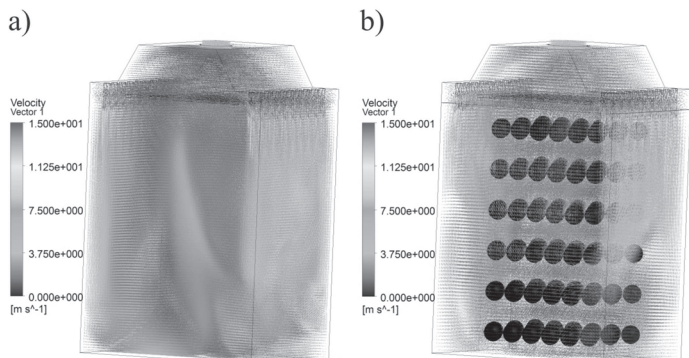
Obliczenia symulacyjne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem solvera *CFX* z zaimplementowanym kodem CFD pozwalającym na rozwiązanie numeryczne układu równań bilansowych w przestrzeni dyskretnego modelu [9]. Przyjęto kryteria zbieżności ustalając wartości RMS na poziomie  $1e-6$  i maksymalną liczbę iteracji wynoszącą 5 000. Zbieżność modelu uzyskano po ok. 4 500 iteracji. Akwizycję wyników wykonano także w programie *CFX*, w module postprocesora.

### Analiza wyników symulacji

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano dane, na podstawie których możliwe było wygenerowanie przestrzennych map rozkładu prędkości przepływu powietrza w komorze. Na rys. 2 przedstawiono rozkład wektorów prędkości w całej przestrzeni wewnętrznej komory pustej (Rys. 2a) i wypełnionej wsadem (Rys. 2b).

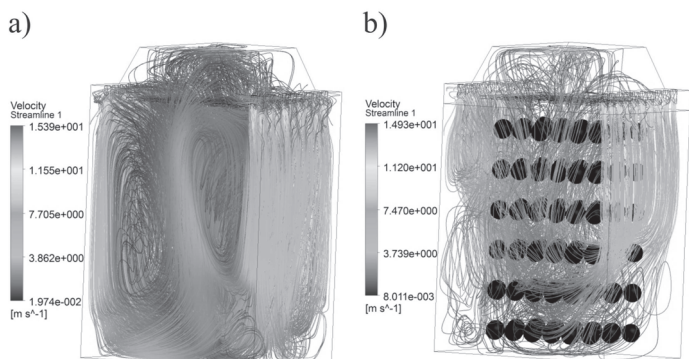
Porównanie rozkładu prędkości przepływu mieszaniny w obu wariantach wykazuje znaczne zróżnicowanie rozkładu dla komory pustej i wypełnionej. Uwydatnia się dla obu tych przypadków brak symetrii

przepływu pomimo symetrycznie rozmieszczonych wlotów oraz symetrycznie rozmieszczonego w przestrzeni komory wsadu. Mapy prędkości wykazują także występowanie znacznych nierównomierności przepływu w komorze, w której znajdują się przeszkody w postaci kulistych szynek. Szczególnie uwydatnia się znaczny spadek wartości prędkości przepływu w dolnej strefie komory, dla trzech najniższych umiejscowionych rzędów wypełnienia oraz w przestrzeniach wewnętrznych partii wsadu położonych wyżej.



Rys. 2. Przemiarowe mapy rozkładu prędkości przepływu w komorze wędzarniczej jednowózkowej: a) pustej, b) wypełnionej wsadem o kształcie kulistym

W celu lepszego zobrazowania zróżnicowania przepływu wyniki dotyczące wartości prędkości przepływu mieszaniny wędzającej zaprezentowano na rys. 3 w postaci linii prądu przepływu z naniesioną skalą barwną zmian prędkości.



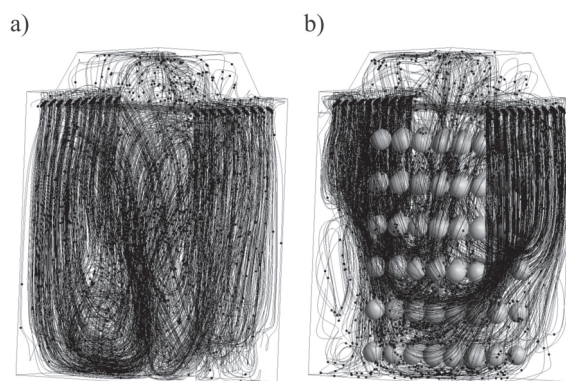
Rys. 3. Linie prądu obrazujące zmianę prędkości przepływu w komorze wędzarniczej jednowózkowej: a) pustej, b) wypełnionej wsadem o kształcie kulistym

Rozkład zmian prędkości wzdłuż linii prądu ujawnia występowanie przestrzeni o niższych wartościach prędkości w centralnej strefie komory pustej, oraz niższych wartościach prędkości w centralnej strefie komory wypełnionej wsadem o kształcie kulistym na poziomach górnych.

Przeprowadzono także analizę śledzenia (*tracking*) cząstek fazy rozproszonej. Na rys. 4 przedstawiono torzy ruchu dymu wędzarniczego dla przykładowych 10 000 cząstek. W modelu przepływu w przestrzeni komory wypełnionej wsadem przyjęto założenie, iż cząstki, które zetkną się z obrabianym surowcem ulegają „przywieraniu” do jego powierzchni.

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

Porównując wyniki uzyskane dla przepływu cząstek dymu w komorze pustej oraz komorze wypełnionej wsadem o kształcie kulistym uwydatnia się występowanie (w przypadku drugiego wariantu) przestrzeni o niskim stopniu koncentracji cząstek dymu w dolnych partiach wsadu oraz w górnych partiach rozmieszczonych w pobliżu osi symetrii komory, czyli w kolumnie prawej i lewej z pominięciem skrajnych oraz środkowej umiejscowionej wzdłuż osi symetrii.



Rys. 4. Torzy ruchu przykładowych 10 000 cząstek dymu: a) w komorze pustej, b) w komorze wypełnionej wsadem

Podsumowując analizę wyników symulacji należy podkreślić, iż opracowany model wymaga, w dalszej części prac, weryfikacji eksperymentalnej. Stanowi ona jednak pewien problem z uwagi na utrudnienia związane z warunkami panującymi wewnątrz komory podczas jej pracy. Wysoki poziom zadymienia wewnątrz komory skutecznie uniemożliwia zastosowanie takich metod pomiaru, jak np. PIV. Możliwa zatem wydaje się jedynie częściowa weryfikacja w oparciu o pomiary z wykorzystaniem zestawu niewielkich obrotowych anemometrów czasowych lub termooanemometrów umiejscowionych np. na ścianach lub wybranych punktach w przestrzeni roboczej komory.

## Wnioski

Przeszkody w postaci wypełnienia wsadem wpływają znacząco na rozkład prędkości przepływu i koncentrację cząstek dymu wędzarniczego.

W przypadku modelu komory z zadeklarowanym wypełnieniem stwierdzono występowanie przestrzeni o niskich wartościach prędkości przepływu mieszaniny. W ujęciu technologicznym ma to istotne znaczenie ze względu na aspekt utrzymania wyrównanej jakości produkcji wyrobów wędzonych, co powiązane jest z równomierną propagacją składników dymu, a więc ograniczeniem występowania „martwych” przestrzeni w przepływie oraz pożądaną absorpcją cząstek dymu zarówno na powierzchni, jak i wewnątrz produktu.

Zbudowany, testowany i analizowany model ma w założeniu stanowić narzędzie optymalizacji, której kryteria zorientowane będą na poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych zabudowy wnętrza komory umożliwiających korzystnie lepsze (ujednorodnione) warunki przepływu mieszaniny w komorze wędzarniczej bez względu na postać geometryczną obrabianego surowca.

Czynnik ekonomiczny i zdrowotny wymusza poszukiwanie nowych rozwiązań rozprzodzenia dymu w komorach wędzarniczych, które pozwolą ograniczyć koszty ponownego, dodatkowego przeprowadzania operacji wędzenia przy występowaniu wady technologicznej niedowędzenia.

## LITERATURA

- [1] E. Kostyra: Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego. T 5, nr 2, 48 (2005).
- [2] Z. Pan; R.P. Singh, T.R. Rumsey: Journal of Food Engineering; 46, nr 1, 9 (2000).
- [3] Olszewski: Technologia przetwórstwa mięsa. wyd. II, Warszawa. 2007.
- [4] M. M. Michalski: Dostawca Przemysłu Mięsnego; 62 (2004).
- [5] Pekmont (12.05.2010) <http://www.pekmont.pl/htm>.
- [6] K. Anifantaki, J. Metaxopoulos, M. Kammenou, E.H. Drosinos, M. Vlasi: Journal of Food Science; 14, 135 (2002).
- [7] E. Sunen, B. Fernandez-Galian, C. Aristimuño: Food Microbiology; 18, 387 (2001).
- [8] Wang Feng-Sheng: Meat Science; 59, 15 (2001).
- [9] Ansys 12.1, Ansys-CFX 12.1, dokumentacja programu.

*Praca finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju jako projekt rozwojowy nr 12-0125-10/2010.*