

ZASTOSOWANIE PROGRAMU FLUENT DO MODELOWANIA ZJAWISK TERMODYNOMICZNYCH W KOMORZE KLIMATYCZNEJ

Dariusz Tomkiewicz, Anatol Cudzewicz, Jolanta Górecka-Orzechowska
Katedra Automatyki, Politechnika Koszalińska

Streszczenie. W pracy przedstawiono badania dotyczące modelowania zjawisk termodynamicznych w projektowanej komorze klimatycznej. Do modelowania zastosowano środowisko Fluent umożliwiające symulacje zjawisk z zastosowaniem numerycznej mechaniki płynów. Na podstawie modelu symulacyjnego wyznaczono prędkości i kierunki przepływu strumieni powietrza w komorze klimatycznej oraz przestrzenny rozkład temperatury powietrza. Dzięki przeprowadzonym badaniom symulacyjnym możliwe było takie rozmieszczenie urządzeń w komorze, aby temperatura powietrza w komorze miała równomierny rozkład.

Słowa kluczowe: modelowanie, numeryczna mechanika płynów, komora klimatyczna, projektowanie

Wprowadzenie

Jedną z bardziej popularnych metod przechowywania zboża jest jego składowanie w silosach. Przechowywanie zboża w silosach ma szereg zalet związanych z wygodą ich użytkowania, dbania o jakość zgromadzonego materiału i manipulowania zgromadzonymi zapasami. Podczas przechowywania zboża może jednak dojść do obniżenia jego, jakości lub nawet całkowitego zepsucia. Czynnikiem wpływającym na jakość zboża podczas jego przechowywania w silosach są zewnętrzne warunki atmosferyczne temperatura i wilgotność powietrza, nasłonecznienie i wiatr powodujące miejscowe nagrzanie lub ochłodzenie ścian silosu, zanieczyszczenia wewnątrz przechowywanego złoża powodujące zwiększenie oporów przepływu powietrza i umożliwiający rozwój mikroflory, pasożytniczych owadów i gryzoni oraz skład atmosfery w powietrzu otaczającym przechowywany produkt.

Aby powstrzymać niekorzystne procesy wewnątrz złoża stosuje się aktywne wietrzenia ziarna, dzięki któremu uzyskujemy zmianę parametrów mikroklimatu wewnątrz zbiornika. Celem aktywnego wietrzenia jest obniżenie temperatury złoża ziarna i usunięcie z wnętrza zbiornika gazowych produktów powstałych na skutek metabolizmu ziarna i innych organizmów znajdujących się wewnątrz.

W celu przeprowadzenia badań dotyczących sterowania procesem wentylacji podczas procesów przechowalniczych w Katedrze Automatyki Politechniki Koszalińskiej zbudowano komorę klimatyczną, której przeznaczeniem jest umożliwienie badań odnośnie: algorytmów sterowania umożliwiających kompensację wpływu warunków atmosferycznych na

jakość przechowywanego zboża, metod monitorowania produktów przechowywanych w różnych warunkach atmosferycznych, badań algorytmów sterowania mikroklimatem wewnątrz komór przechowalniczych oraz badań dotyczących sterowania systemami HVAC.

W trakcie prowadzenia prac projektowych komory wyłonił się problem związany z rozmieszczeniem urządzeń klimatyzacyjnych i obiektów wewnątrz komory tak, aby osiągnąć równomierny rozkład temperatury powietrza wewnątrz komory.

Celem badań było przeprowadzenie eksperymentów symulacyjnych z wykorzystaniem programu Fluent umożliwiających optymalizację rozmieszczenia urządzeń klimatycznych ze względu na równomierność rozkładu temperatury wewnątrz zbiornika.

Badania symulacyjne z wykorzystaniem techniki numerycznej mechaniki płynów

Numeryczna mechanika płynów Computational Fluid Dynamics (CFD) jest metodą symulacji zachowania systemów, procesów i urządzeń związanych z przepływem gazów i płynów, wymiany ciepła i masy, reakcji chemicznych i innych podobnych zjawisk fizycznych. Programy CFD pozwalają uzyskać niezbędne informacje o przepływie płynu (rozkład pola prędkości, pola ciśnienia), ruchu ciepła (pole temperatury) i innych zjawisk towarzyszących (w tym reakcji chemicznych). Osiąga się to przez numeryczne rozwiązanie równań opisujących przemieszczanie masy płynu i bilansu energii. Dzięki zastosowaniu CFD mamy możliwość przeprowadzenia szczegółowej analizy zagadnień związanych z przepływem płynów eliminując przy tym konieczność przeprowadzenia czasochłonnych i kosztownych badań doświadczalnych podczas cyklu projektowania i modernizacji urządzeń [Hoang i in. 2000; Kaleta i in. 2009; Norton i in. 2007].

Metody CFD, mogą być stosowane w celu symulacji: spadków ciśnienia podczas przepływu płynów, siły nośnej na skrzydłach samolotów, ciągu wirnika, przepływu powietrza w urządzeniach klimatyzacji, rozkładu temperatury w pomieszczeniach, procesu mieszania itp.

Na rynku dostępnych jest szereg programów komercyjnych do obliczeń CFD o bardzo rozbudowanych możliwościach obliczeniowych. Oprogramowanie to w większości przypadków wykorzystuje metodę objętości skończonych. Zastosowanie oprogramowania do obliczeń CFD umożliwia rozwiązywanie zagadnień praktycznych, odznaczających się skomplikowaną geometrią i złożonymi procesami fizycznymi i chemicznymi.

Podczas badań zostało zastosowane oprogramowanie Fluent. Oprogramowanie to umożliwia: optymalne wykorzystanie mocy systemu komputerowego, przetwarzanie równoległe i prace w rozproszonym układzie obliczeniowym, zastosowanie wielu metod dyskretyzacji poprzez rozmaitego typu siatki dwu i trójwymiarowe.

Środowisko Fluent po wprowadzeniu opisu geometrii badanego obiektu w postaci siatki umożliwia: zadanie warunków brzegowych i początkowych, zdefiniowanie właściwości płynów i ciał stałych, wybór modelu opisującego zjawiska transportu masy i energii, wybór solvera, poprawę parametrów siatki oraz prezentację wyników symulacji.

Model komory klimatycznej

W procesie symulacji w środowisku Fluent występują następujące etapy: wprowadzenie geometrii układu, podział geometrii na elementy dyskretne (generacja siatki), wybór mo-

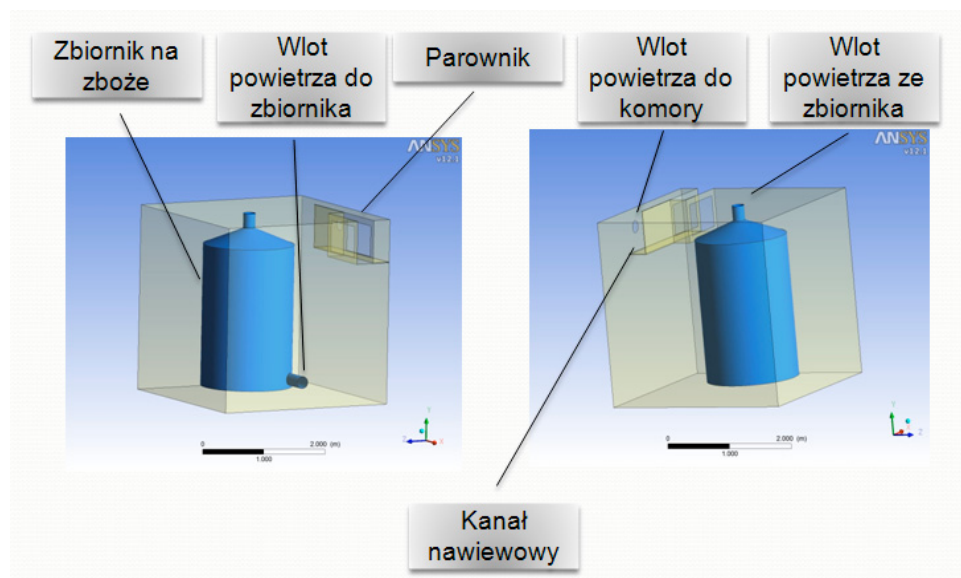
delu matematycznego i wprowadzenie parametrów modelu, wprowadzenie warunków brzegowych i początkowych, rozwiązanie problemu przy pomocy solwera, opracowanie graficzne wyników symulacji.

Badanym obiektem była komora klimatyczna. Zadaniem komory klimatyzacyjnej jest odwzorowanie rzeczywistych warunków atmosferycznych w celu zbadania ich wpływu na zjawiska zachodzące wewnątrz zbiornika służącego do przechowywania ziarna zbóż. Komora ma umożliwiać ciągłą zmianę wartości temperatury powietrza w zakresie od -20°C do $+40^{\circ}\text{C}$ oraz wilgotności względnej powietrza w zakresie od 10 do 100%.

W komorze o wymiarach $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$ znajduje się zbiornik na zboże o wymiarach: 2 m wysokości i $1,5\text{ m}$ średnicy. Do dolnej części zbiornika można tłoczyć powietrze w celu aktywnego wietrzenia złoża ziarna. W komorze oprócz zbiornika znajduje się chłodnica o wydajności chłodniczej $8,3\text{ kW}$, wyposażona w dwa wentylatory promieniowe umożliwiające wymuszenie przepływu powietrza równego $4630\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ oraz grzałki o mocy $4,1\text{ kW}$ (rys. 1). W celu skompensowania ubytku powietrza wyprowadzanego po przejściu przez złożę ziarna na zewnątrz komory w ścianie znajduje się zawór dekompresyjny umożliwiający dopływ powietrza z zewnątrz do komory.

Celem przeprowadzania eksperymentów symulacyjnych było takie dobranie położenia chłodnicy oraz zaworu dekompresyjnego aby temperatura powietrza w komorze była jak najbardziej równomiernie rozłożona.

W trakcie procesu modelowania do przygotowania geometrii i siatki obliczeniowej wykorzystano środowisko ANSYS Workbench 12.1. Siatka obliczeniowa obejmowała łącznie 39241 węzłów (objętości kontrolnych), liczba elementów rodzaju tetrahedron była równa 208152.



Rys. 1. Schemat komory klimatycznej z silosem w środku
Fig. 1. Schema of the climatic chamber with the storage silo in the middle

Kolejnym krokiem procesu symulacji jest wprowadzenie przestrzeni geometrii wraz siatką do środowiska Fluent. Z bazy danych parametrów materiałowych zostały dobrane parametry termodynamiczne powietrza.

Obliczenia przeprowadzono dla następujących założeń upraszczających. Założono, że przepływ gazu jest przepływem jednofazowym. Zmianę gęstości gazu opisuje równanie dotyczące nieściśliwego gazu idealnego.

Założono, że energia cieplna nie przenosi się na skutek promieniowania, transport masy można opisać za pomocą modelu RANS (Reynolds - Averaged Navier - Stokes), w którym równanie ciągłości ma postać:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i) = 0, \quad (1)$$

w równaniu tym ρ oznacza a u_i to prędkość ośrodka. Równanie pędu:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\rho \overline{u_i' u_j'} \right) \quad (2),$$

gdzie μ to lepkość molekularna, δ_{ij} to delta Kroneckera. W równaniu tym przyjęto rozwiązanie Boussinesqa opisujące naprężenia Reynoldsa:

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}, \quad (3)$$

w którym μ_t to lepkość turbulencji.

Zastosowano model Spalart-Allmaras wykorzystujący jedno równanie opisujące molekularną lepkość kinematyczną w obszarach przyściennych:

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{v} u_i) = G_{\tilde{v}} + \frac{1}{\sigma_{\tilde{v}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \rho \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right) + C_{b2\rho} \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v + S_{\tilde{v}}. \quad (4)$$

gdzie

- $\sigma_{\tilde{v}}$ – tłumienie lepkie,
- $G_{\tilde{v}}$ – funkcja generowania turbulencji,
- $Y_{\tilde{v}}$ – funkcja destrukcji turbulencji,
- $S_{\tilde{v}}$ – funkcja generacji zdefiniowana przez użytkownika.

Założono, że można pominąć proces wymiany ciepła w chłodnicy i zastąpić go układem, w którym zastosowano stałą prędkość powietrza na wlocie i wylocie z chłodnicy oraz na wlocie do zbiornika oraz stałą temperaturę powietrza na wylocie z chłodnicy.

Przyjęto, że ścianki komory są idealnie izolowane oraz ścianki zbiornika na zewnątrz dostarczają do komory stały strumień ciepła.

Transport ciepła opisano równaniem:

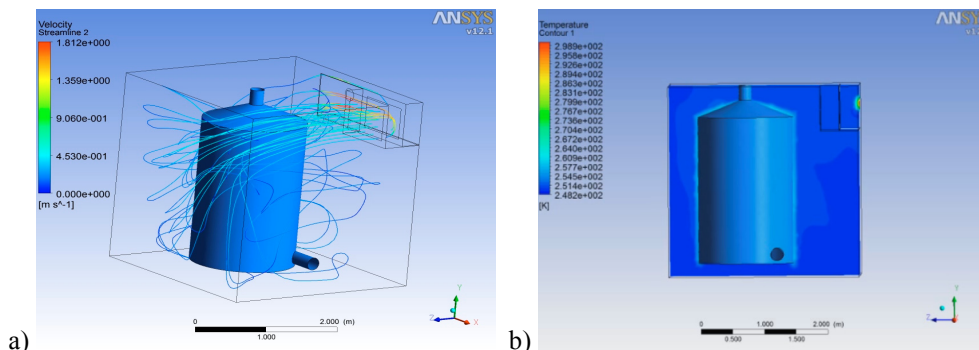
$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i \left(\overline{\tau_{ij}} \right)_{eff} \right] + S_h, \quad (5)$$

gdzie E to energia, k to przewodność cieplna a tensor naprężeń jest równy:

$$\left(\overline{\tau_{ij}} \right)_{eff} = u_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{2}{3} u_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}. \quad (6)$$

Do rozwiązania równań metodą objętości skończonych zastosowano algorytm typu PI-SO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators). Wyniki opisujące przemieszczenie strumienia powietrza wychodzącego z chłodnicy zaprezentowano na rys. 2a.

Po przeprowadzeniu szeregu eksperymentów symulacyjnych zmieniono pierwotne założenia konstrukcyjne. Zastosowano dodatkowy kanał na wlocie powietrza oraz przemieszczono położenie zaworu dekompresyjnego. Dzięki zastosowaniu kanału nawiewowego udało się zapobiec zawracaniu powietrza na wlot do chłodnicy bezpośrednio po wyjściu z niej. Dzięki eksperymentom symulacyjnym zaobserwowano, iż tworzyła się zastoina powietrza o podwyższonej temperaturze w górnym rogu komory przeciwległym do położenia chłodnicy. Przesunięcie zaworu dekompresyjnego do miejsca, w którym powietrze wlatuje do kanału nawiewowego zapobiegło unoszeniu się ciepłego powietrza do górnej części komory. Rozkład temperatury dla końcowego usytuowania urządzeń w komorze przedstawiono na rysunku 2b.

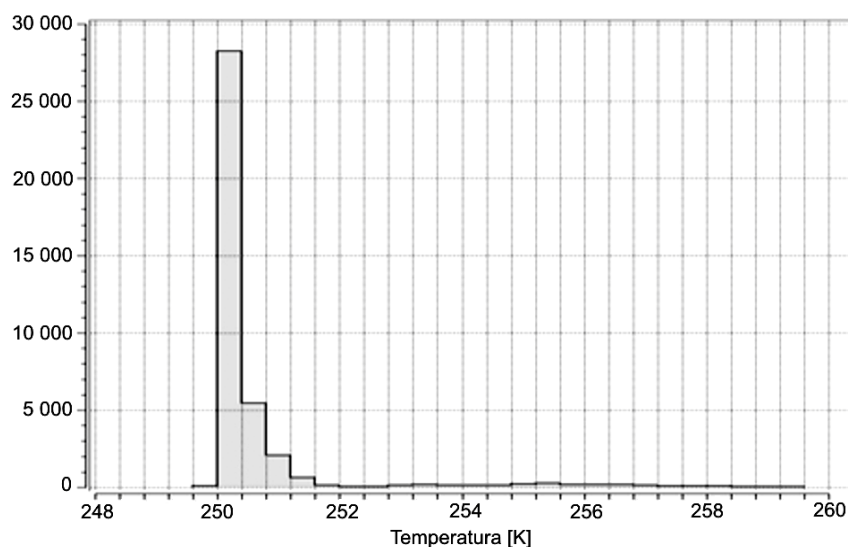


Rys. 2. Wyniki symulacji a) prędkość powietrza od strony wylotu z chłodnicy, b) rozkład temperatury w środkowej części komory

Fig. 2. The simulation results a) air velocity from the outlet of the heat exchanger, b) temperature distribution in the central part of the chamber

Histogram opisujący temperaturę powietrza w komorze klimatycznej przedstawiono na rys. 3. Wartości temperatury powietrza zostały obliczone dla każdej objętości skończonej.

Wyniki wskazują na jednorodną wartość temperatury w komorze dla proponowanego rozmieszczenie urządzeń znajdujących się w jej wnętrzu. Średnia wartość temperatury w komorze wynosiła 250,12 K a odchylenie standardowy kształtowało się na poziomie 0,25 K.



Rys. 3. Histogram rozkładu temperatury powietrza wypełniającego komorę
Fig. 3. Histogram of the air temperature distribution in chamber

Podsumowanie

Zastosowanie techniki modelowania i symulacji z wykorzystaniem pakietu Fluent umożliwiło zaprojektowanie komory klimatycznej. Na podstawie modelu symulacyjnego wyznaczono prędkości i kierunki przepływu strumieni powietrza w komorze oraz rozkład temperatury. Dzięki przeprowadzonym badaniom symulacyjnym możliwe było rozmieszczenie urządzeń w komorze tak, aby temperatura powietrza w komorze była równomierna.

Bibliografia

- Hoang M. L., Verboven P., De Baerdemaeker J.** 2000. Analysis of the air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics. *International Journal of Refrigeration*. Vol. 23. pp. 127-140.
- Kaleta A., Górnicki K.** 2009. *Podstawy Techniki Ciepłej w Inżynierii Rolniczej*. Wydawnictwo SGWW. Warszawa. ISBN 978-83-7583-105-4.
- Kołodziejczyk M., Butrymowicz D.** 2010. Modelowanie procesów ciepło-przepływowych w komorze przechowalniczej warzyw. *Chłodnictwo*. Nr 8. s. 36-43.
- Norton T. Da-Wen Sun.** 2007. Applications Of Computational Fluid Dynamics (CFD) In The Modelling And Design Of Ventilation Systems In The Agricultural Industry: A review. *Bioresource Technology* 98. pp. 2386-2414.

APPLICATION OF THE FLUENT PROGRAMME FOR MODELLING OF THERMODYNAMIC PROCESSES IN THE CLIMATIC CHAMBER

Abstract. The study presents the research on modelling of thermodynamic processes in the climatic chamber, which is being designed. The Fluent application, which enables simulation of phenomena using a computational fluid dynamics, was used for modelling. Velocity and directions of air streams flow in the climatic chamber and spatial temperature distribution have been determined based on the simulation model. The simulation research, which was carried out allowed for such a distribution of devices inside the chamber so that the air temperature in the chamber was uniform.

Key words: modelling, computational fluid dynamics, climatic chamber, design

Adres do korespondencji:

Dariusz Tomkiewicz; e-mail: dariusz.tomkiewicz@tu.koszalin.pl

Katedra Automatyki

Politechnika Koszalińska

ul. Raławicka 15

75-620 Koszalin