

MODELOWANIE PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH WYSTĘPUJĄCYCH W PIECZARKARNIACH: MODEL WYMIANY CIEPŁA I MASY

Ewa Wachowicz, Leonard Woroncow
Katedra Automatyki, Politechnika Koszalińska

Streszczenie. W pracy omówiony zostanie matematyczny i komputerowy model procesów wymiany ciepła i masy, z którymi mamy do czynienia w pieczarkarniach. Następnie przedstawione zostaną wyniki badań symulacyjnych, przeprowadzonych z wykorzystaniem środowiska programowego MATLAB.

Słowa kluczowe: pieczarkarnia, procesy technologiczne, modelowanie, symulacja

Wykaz oznaczeń

c	– ciepło właściwe [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
CO_{2p}	– strumień dwutlenku węgla wydzielany przez podłoże [$kg \cdot s^{-1}$],
G	– masowe natężenie przepływu powietrza [$kg \cdot s^{-1}$],
H	– strumień wody [$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$],
M	– masa powietrza [kg],
P_{otocz}	– cząstkowe ciśnienie pary w powietrzu hali [Pa],
P_{par}	– ciśnienie nasyconej pary przy powierzchni uprawy [Pa],
r_{par}	– ciepło parowania wody [$J \cdot kg^{-1}$],
S	– pole powierzchni [m^2],
T	– temperatura [K],
T_{gp}	– temperatura graniczna podłoża uprawy [K],
w	– zawartość dwutlenku węgla [$kg_{CO_2} \cdot kg^{-1}$],
x	– zawartość wody w powietrzu [$kg_{H_2O} \cdot kg^{-1}$],
Y	– metaboliczny współczynnik wydzielania ciepła przez podłoże [$J \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$],
α_{hp}	– współczynnik przewodzenia ciepła pomiędzy podłożem uprawy a powietrzem [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].

Indeksy:

km	– komora mieszania,
s	– spryskiwacz podłoża,
CO ₂	– instalacja CO ₂ ,

h	– hala,
p	– podłoże uprawy,
ph	– powietrze nawiewane do hali,
pz	– powietrze zewnętrzne,
pw	– powietrze wywiewane z hali do otoczenia,
pc	– powietrze wyprowadzane z hali do komory mieszania,
śc	– ściany pieczarkarni.

Wprowadzenie

Analizując procesy technologiczne występujące wewnątrz pieczarkarni można stwierdzić, że opierają się one głównie na procesach wymiany ciepła i masy zachodzących w powietrzu wewnętrznym oraz w podłożu uprawowym, a także pomiędzy tymi ośrodkami [Szudyga, Maszkiewicz 1995]. Wpływ na przebieg tych procesów mają hodowane w pieczarkarni grzyby oraz otoczenie, tzn. powietrze zewnętrzne. Znajomość procesów technologicznych jest punktem wyjścia podczas tworzenia matematycznych modeli tych procesów. Celem pracy było:

- sformułowanie matematycznego oraz komputerowego modelu procesów zachodzących w hali uprawowej pieczarkarni,
- przeprowadzenie badań symulacyjnych procesów z wykorzystaniem opracowanego modelu,
- weryfikacja empiryczna modelu.

Model procesów zachodzących w pieczarkarni opracowany został dla potrzeb automatyzacji tych procesów.

Matematyczny i komputerowy model procesów zachodzących w pieczarkarni

Matematyczny model procesów zachodzących w pieczarkarni sformułowano, przyjmując następujące założenia:

- zawartość CO₂ w powietrzu hali nie będzie przekraczała 5000 ppm (0,5%), można zatem pominąć wpływ CO₂ na parametry fizyczne powietrza w hali;
- pominięto zmiany parametrów podłoża (gęstość, ciepło właściwe) w wyniku jego irygacji, gdyż maksymalna zawartość wody w kompoście wynosi 4%;
- wartość strumienia powietrza z centrali klimatycznej do hali została ustalona na podstawie badań symulacyjnych, przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu kanału nawiewowego [Vorontsov, Wachowicz 2008], którą odczytano w stanie ustalonym i użyto w modelu opisującym wymianę ciepła i masy w pieczarkarni.

Model matematyczny procesów wymiany ciepła i masy w pieczarkarni składa się z pięciu równań [Wachowicz, Vorontsov 2009]. Równania te opisują zmiany w czasie:

- entalpii powietrza w hali (równanie 1),
- zawartości wody w powietrzu w hali (równanie 2),
- entalpii podłoża w hali (równanie 3),
- zawartości wody w podłożu w hali (równanie 4)
- zawartości dwutlenku węgla w powietrzu wewnątrz hali uprawowej (równanie 5).

Modelowanie procesów ...

$$M_h \cdot c_h \cdot \frac{dT_h}{dt} = \underbrace{\alpha_{hp} \cdot S_p \cdot (T_p - T_h)}_{\text{Strumień ciepła z podłoża uprawy}} - \underbrace{G_{pc} \cdot c_h \cdot T_h}_{\text{Strumień ciepła odprowadzany do komory mieszania}} - \underbrace{G_{pw} \cdot c_h \cdot T_h}_{\text{Strumień ciepła odprowadzany wraz z wywiewanym powietrzem}} + \underbrace{G_{ph} \cdot c_h \cdot T_n}_{\text{Strumień ciepła wprowadzany do hali wraz z powietrzem z centrali klimatycznej}} - \underbrace{\alpha_{SC} \cdot A \cdot (T_h - T_{pz})}_{\text{Strumień ciepła odprowadzany do otoczenia}} \quad (1)$$

$$M_h \cdot \frac{dx_h}{dt} = \underbrace{x_n \cdot G_{ph}}_{\text{Strumień wody doprowadzany z centrali klimatycznej do hali}} + \underbrace{c_1 \cdot S_p \cdot (P_{par} - P_{otocz})}_{\text{Strumień wody odparowywany do powietrza hali z podłoża uprawy}} - \underbrace{G_{pw} \cdot x_h}_{\text{Strumień wody odprowadzany do otoczenia}} - \underbrace{G_{pc} \cdot x_h}_{\text{Strumień wody odprowadzany do komory mieszania}} \quad (2)$$

$$M_p \cdot c_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = Y \cdot M_p \cdot \left(\frac{T_{sp}}{T_p} - 1 \right) - \underbrace{r_{par} \cdot H_h}_{\text{Strumień ciepła zużytego na odparowanie wody z podłoża}} - \underbrace{\alpha_{hp} \cdot S_p \cdot (T_h - T_p)}_{\text{Strumień ciepła oddawany do powietrza hali}} \quad (3)$$

$$M_p \cdot \frac{dx_p}{dt} = \underbrace{S_p \cdot H_s}_{\text{Strumień wody uzyskany ze spryskiwacza}} - \underbrace{c_1 \cdot S_p \cdot (P_{par} - P_{otocz})}_{\text{Strumień wody odparowywany do powietrza hali z podłoża uprawy}} \quad (4)$$

$$M_h \cdot \frac{dw_h}{dt} = \underbrace{G_{ph} \cdot w_{km}}_{\text{Strumień CO}_2 \text{ w nawiewanym do hali powietrzu}} + \underbrace{G_{CO_2} \cdot w_{CO_2}}_{\text{Strumień CO}_2 \text{ dostarczany z instalacji CO}_2} - \underbrace{G_{pc} \cdot w_h}_{\text{Strumień CO}_2 \text{ w powietrzu hali odprowadzany do komory mieszania}} - \underbrace{G_{pw} \cdot w_h}_{\text{Strumień CO}_2 \text{ wyprowadzany z hali wraz z wywiewanym powietrzem}} + \underbrace{G_{CO_2p}}_{\text{Strumień CO}_2 \text{ wydzielany przez podłoże}} \quad (5)$$

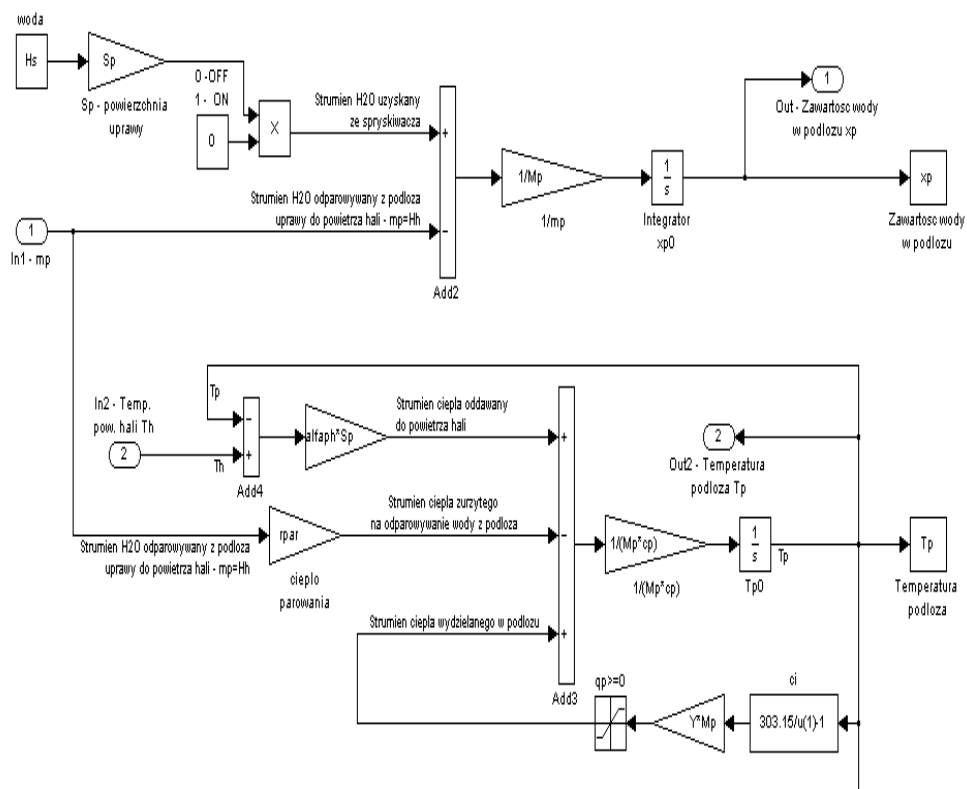
Równania powyższe uzupełnione są warunkami początkowymi:

$$T_h(z,0) = T_h(z), \quad x_h(z,0) = x_h(z), \quad T_p(z,0) = T_p(z), \quad x_p(z,0) = x_p(z), \quad w_h(z,0) = w_h(z) \quad (6)$$

i brzegowymi:

$$T_h(z,0) = T_{ph}(z), \quad x_h(z,0) = x_{ph}(z). \quad (7)$$

Zaprezentowane wyżej równania (1 do 5), stanowiące model procesów wymiany ciepła i masy w pieczarkarni, zostały zaimplementowane w środowisku programowym MATLAB w przyborniku Simulink [Tarnowski 2004]. Implementację równań (3 i 4) pokazano przykładowo na rysunku 1.



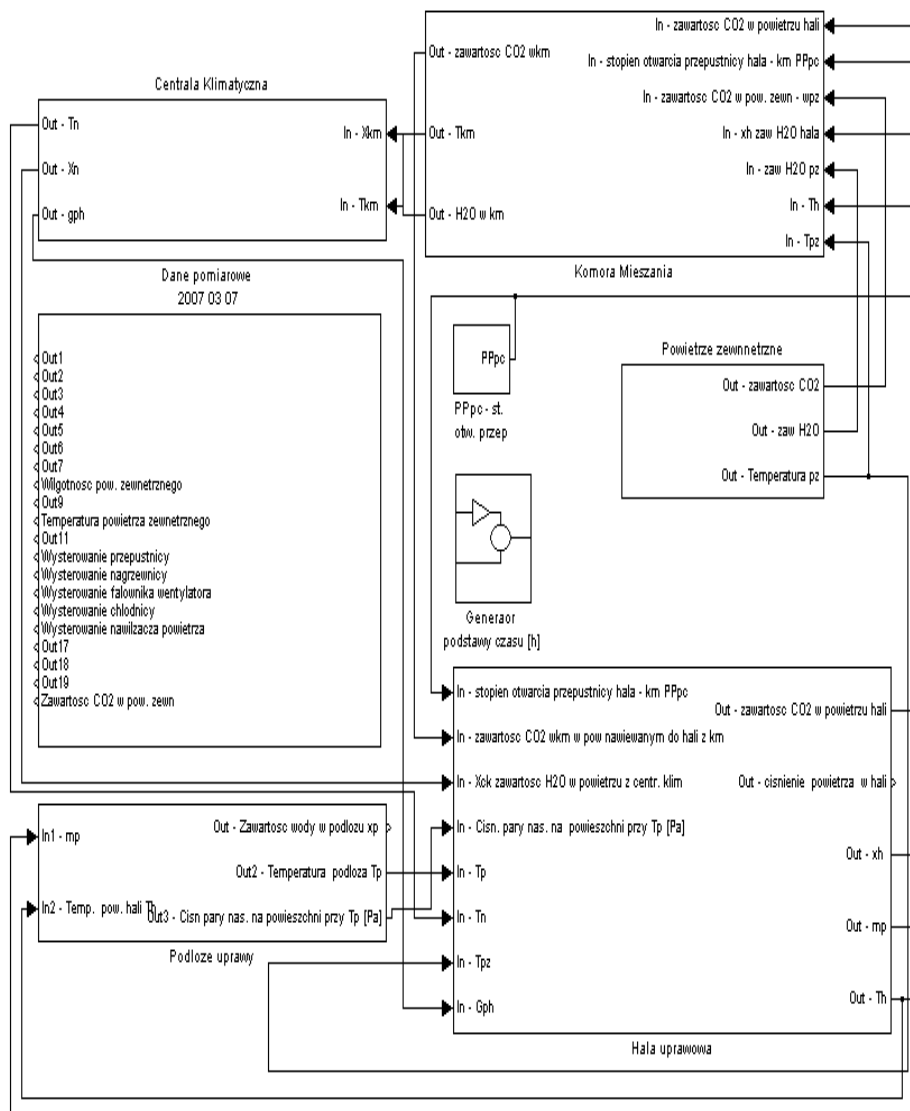
Źródło: opracowanie własne

Rys. 1. Implementacja równań (3 i 4) modelu procesów wymiany ciepła i masy w pieczarkarni w środowisku programowym MATLAB

Fig. 1. Implementation of equations (3 and 4) of the model of heat and mass exchange processes in the mushroom-growing cellar in the MATLAB program environment

Zrealizowany w środowisku MATLAB komputerowy model procesów wymiany ciepła i masy w zachodzących w powietrzu w hali uprawowej oraz podłożu w pieczarkarni przedstawiono na rysunku 2. Jak to widać na rysunku komputerowy model procesu technologicznego jest częścią składową kompleksowego modelu pieczarkarni, zawierającego także modele:

- układu wentylacji i klimatyzacji,
- układu automatyki,
- otoczenia [Wachowicz 1990].



Źródło: opracowanie własne

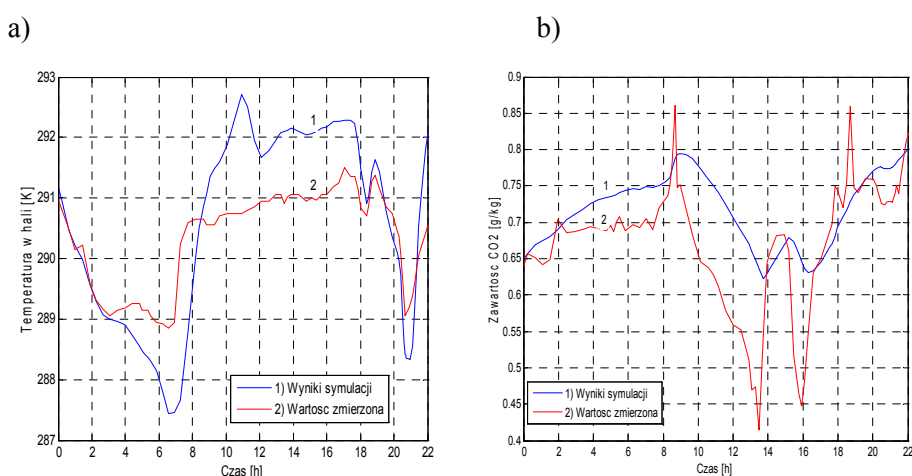
Rys. 2. Kompleksowy, komputerowy model pieczarkarni, zawierający komputerowe modele procesów wymiany ciepła i masy w powietrzu oraz podłożu w pieczarkarni
 Fig. 2. Comprehensive complex model of the mushroom-growing cellar containing computer models of heat and mass exchange processes in the air and ground in the mushroom-growing cellar.

Przykładowe wyniki badań symulacyjnych procesów zachodzących w pieczarkarni

Na rysunku 3 pokazano przykładowe przebiegi:

- temperatury powietrza wewnętrznego (rys. 3a),
- zawartości dwutlenku węgla w powietrzu wewnętrznym (rys. 3b)

obliczone na podstawie znajomości komputerowego modelu procesów wymiany ciepła i masy w pieczarkarni. Wyniki symulacji porównano z rzeczywistymi przebiegami tych parametrów, zmierzonymi w pieczarkarni w Wersku.



Rys. 3. Przykładowe przebiegi: a) temperatury powietrza wewnętrznego i b) zawartości dwutlenku węgla w powietrzu wewnętrznym uzyskane podczas badań symulacyjnych oraz badań eksperymentalnych

Fig. 3. Examples of courses: a) internal air temperature and b) content of carbon dioxide in the internal air obtained during simulation tests and experimental tests

Na podstawie przebiegów pokazanych na rysunku 3 można stwierdzić, że zaprezentowany w pracy matematyczny model poprawnie opisuje przebieg procesów technologicznych zachodzących w pieczarkarni.

Ponadto dokonana analiza błędów modelu potwierdza poprawność struktury modelu ponieważ maksymalny błąd względny modelu wymiany ciepła w powietrzu nie przekracza 5,0%, zaś maksymalny błąd względny modelu opisującego zmiany zawartości dwutlenku węgla w powietrzu wewnętrznym nie przekracza 8,5%.

Podsumowanie

W pracy zaprezentowane zostały rezultaty pierwszego etapu prac nad opracowaniem energooszczędnego systemu sterowania mikroklimatem w pieczarkarni. Efektem tych prac jest model matematyczny i komputerowy procesów wymiany ciepła i masy zachodzących w pieczarkarni.

Analiza logiczna otrzymanych wyników badań symulacyjnych oraz weryfikacja empiryczna modelu pozwalają stwierdzić, że model procesów został wykonany poprawnie. Zaproponowany w pracy model procesów wymiany ciepła i masy w budynku pieczarkarni zostanie wykorzystany podczas opracowywania i testowania energooszczędnych algorytmów sterowania urządzeniami wentylacji i klimatyzacji w budynku pieczarkarni.

Bibliografia

- Tarnowski W.** 2004. Modelowanie systemów. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej. Koszalin. ISBN 83-7365-052-0.
- Vorontsov L., Wachowicz E.** 2008. Modelowanie przepływu powietrza w kanałach wentylacyjnych pieczarkarni. Inżynieria Rolnicza. Nr 10(108). s. 269-276.
- Wachowicz E., Vorontsov L.** 2009. Simulation of heat and mass exchange processes proceeding in mushroom-growing cellars. Polish Journal of Environmental Studies. Vol. 18. No 4B. pp. 216-220.
- Wachowicz E.** 1990. Sterowanie pracą urządzeń wentylacji i klimatyzacji w przechowalniach ziemniaków, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej. Koszalin. ISSN 1429-7264.
- Szudyga K., Maszkiewicz J.** 1995. Uprawa pieczarek. HORTPRESS. Warszawa. ISBN 83-86384-01-8.

MODELLING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OCCURRING IN MUSHROOM-GROWING CELLARS: HEAT AND MASS EXCHANGE MODEL

Abstract. In this work, the mathematical and computer model of heat and mass exchange processes that occur in mushroom-growing cellars will be discussed. Later, results of simulation tests carried out with the use of the MATLAB program environment will be presented.

Key words: mushroom-growing cellar, technological processes, modelling, simulation

Adres do korespondencji:

Ewa Wachowicz; e-mail: Ewa.Wachowicz@tu.koszalin.pl
Katedra Automatyki
Politechnika Koszalińska
ul. Raławicka 15/17
75-620 Koszalin