

Marian Szarycz, Eugeniusz Kamiński, Kamil Jałoszyński
Instytut Inżynierii Rolniczej
Akademia Rolnicza we Wrocławiu

MATEMATYCZNE MODELOWANIE PROCESU SUSZENIA W NIERUCHOMYM ZŁOŻU. CZĘŚĆ II. WERYFIKACJA MODELU

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki symulacji procesu suszenia materiału siewnego seradeli oraz porównano je z wynikami uzyskanymi empirycznie. Dla przeprowadzenia obliczeń wykonano doświadczenia uzależniające współczynnik suszarniczy K oraz równowagową zawartość wody u_r od temperatury i wilgotności względnej powietrza. Weryfikacja modelu podczas suszenia materiału siewnego seradeli wykazała dobrą zbieżność danych obliczonych i eksperymentalnych.

Słowa kluczowe: model matematyczny, suszenie w nieruchomym złożu, weryfikacja, seradela

Wykaz oznaczeń

- t_g – temperatura gazu [$^{\circ}\text{C}$],
- t_m – temperatura materiału [$^{\circ}\text{C}$],
- u – zawartość wody w materiale [kg/kg],
- K – współczynnik suszarniczy [1/min],
- F – pole przekroju suszarki [m^2],
- v_g – prędkość powietrza [m/s],
- ζ_g – gęstość gazu [kg/m^3],
- x – zawartość wody w powietrzu [kg/kg],
- u_r – równowagowa zawartość wody [kg/kg],
- φ_g – względna wilgotność powietrza [%],
- h – grubość warstwy elementarnej [m],
- c – ciepło właściwe [kJ/kg K],
- i – krok warstwowy [-],
- j – krok czasowy [-].

Wstęp i cel pracy

Celem niniejszej pracy jest empiryczna weryfikacja modelu matematycznego procesu suszenia w nieruchomej warstwie, sformułowanego w części pierwszej. Matematyczne modelowanie procesu suszenia, pozwalające na przewidywanie skutków zastosowanych parametrów procesowych w odniesieniu do suszonego materiału wymaga dokładnego rozpoznania cech fizycznych tegoż materiału. Zweryfikowany model matematyczny dostarcza informacji o przebiegu procesu, których uzyskanie na drodze empirycznej jest niejednokrotnie bardzo utrudnione. W szczególności dotyczy to suszenia materiałów ziarnistych, których cząstki mają niewielkie wymiary. Utrudniony jest wtedy pomiar np. temperatury cząstek, zmieniającej się w czasie. Informacja o temperaturze, do jakiej nagrzewane są cząstki ma kluczowe znaczenie w przypadku materiału nieodpornego termicznie, np. materiału siewnego. Dlatego też obiektem badań weryfikacyjnych modelu matematycznego był materiał siewny seradeli.

Równania modelowe

Weryfikowany model matematyczny opiera się o równania pozwalające na przewidywanie temperatury czynnika suszącego przechodzącego przez złożę (równanie 1), temperatury materiału (równanie 2) oraz stanu uwilgotnienia cząstek w czasie trwania procesu. Ponieważ w czasie suszenia w grubej nieruchomej warstwie może dochodzić do wtórnego nawilgacania złoża, stan uwilgotnienia opisano równaniem, gdy zachodzi suszenie (równanie 3) oraz równaniem, gdy zachodzi wykraplanie pary wodnej na skutek przekroczenia wilgotności równowagowej powietrza w stosunku do wilgotności materiału (równanie 4).

$$tg_{ij} = tg_{i|j-1} - \frac{tg_{j|i-1} - tm_{i|j-1}}{F \cdot v_g \cdot \zeta_g \cdot c_g \cdot m_{ij}} \left\{ 1 - \exp[(-a\alpha)F \cdot h \cdot m_{ij}] \right\} \quad (1)$$

$$tm_{ij} = tg_{i|j-1} + [tg_{j|i-1} - tg_{ij}] \Psi_{ij} \frac{F \cdot v_g \cdot \zeta_g \cdot c_g}{M \cdot c_m} \quad (2)$$

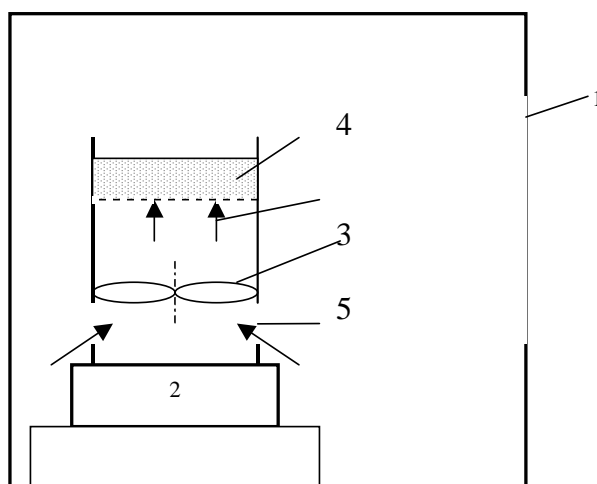
$$u_{ij} = u_{(i-1)j} - A e^{-K_{ij} \Delta \tau} (u_0 - u_{r_{ij}}) + u_{r_{ij}} \quad (3)$$

$$u_{ij} = u_{i(j-1)} + \Delta u'_{ij} = u_{i(j-1)} + \frac{x_{ij} - x_{j|i-1}}{\frac{M_s}{\Delta \tau}} \cdot F \cdot v_g \cdot \zeta_g \quad (4)$$

W równaniach tych występują: współczynnik suszarniczy K , który, przy założonej prędkości przepływu powietrza zależy od jego temperatury i wilgotności, oraz równowagowa zawartość wody u_r zależna od temperatury i wilgotności powietrza. Dlatego też należało wykonać badania w celu otrzymania równań ich zmienności.

Badania wstępne

W celu otrzymania równań opisujących zmienność współczynnika suszarniczego K i równowagowej zawartości wody u_r wykonano badania wstępne. Badania wstępne wykonano na stanowisku, przedstawionym na rysunku 1.



Rys. 1. Stanowisko do wyznaczania wpływu temperatury i wilgotności względnej powietrza na współczynnik suszarniczy K oraz na równowagową zawartość wody w materiale u_r . 1 – komora klimatyzacyjna, 2 – waga, 3 – wentylator, 4 – materiał, 5 – szczeliny regulacji przepływu powietrza

Fig. 1. Stand for determination of air temperature and relative humidity effect on drying coefficient K and balance water content in material, u_r . 1 – air washer, 2 – scales, 3 – fan, 4 – material, 5 – air flow control gaps

W komorze klimatyzacyjnej (1) umieszczono wagę (2) na szali której zamontowano stanowisko doświadczalne. Wentylator (3) przedmuchiwał warstwę materiału, umieszczoną na sicie (4). Powietrze zasysane było poprzez szczeliny regulujące prędkość przepływu powietrza (5). Prędkość przepływu powietrza ustalono na 0,2 m/s, temperaturę powietrza zmieniano w zakresie 10 – 40°C a jego wilgotność w zakresie 10 – 90%.

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano równania opisujące współczynnik suszarniczy (równanie 5) oraz równanie opisujące równowagową zawartość wody u_r (równanie 6).

$$K = 0,557 * 10^{-6} t_g^{2,83} - 1,667 * 10^{-4} \varphi_g + 1,967 * 10^{-3} \quad (5)$$

dla:

$$v_g = 0,2 \text{ [m/s]}; \quad 10^\circ\text{C} \leq t_g \leq 40^\circ\text{C}; \quad 10\% \leq \varphi_g \leq 90\%$$

$$u_r = 0,446 * 10^{-6} \varphi_g^{2,73} - 14 t_g^2 * 10^{-6} + 0,32 * 10^{-3} * t_g + 0,082 \quad (6)$$

dla:

$$10^\circ\text{C} \leq t_g \leq 40^\circ\text{C}; \quad 10\% \leq \varphi_g \leq 90\%$$

Założenia upraszczające

Dla potrzeb symulacji procesu przyjęto następujące założenia:

1. Ciepło właściwe wilgotnego materiału jest sumą ciepła właściwego suchej masy i wody zawartej w suchej masie;
2. Wymiary i kształt suszonych cząstek zmieniają się podczas suszenia nieistotnie;
3. Objętościowy współczynnik wnikania ciepła jest zależny od temperatury powietrza;
4. Gęstość i gęstość usypowa suszonego materiału zmieniają się wraz z zawartością wody w niewielkim zakresie i przyjęto je jako stałe;
5. Ciepło parowania wody z materiału jest równe ciepłu parowania wody ze swobodnej powierzchni;
6. Jako cienką warstwę przyjmuje się warstwę o grubości 2 mm;
7. Gruba warstwa jest sumą warstw cienkich;
8. Gęstość powietrza uzależniono od temperatury. W badanym zakresie temperatur (10-40⁰C) –przyjęto liniową zmianę gęstości;
9. Prędkość pozorna powietrza, jego temperatura i wilgotność w przekroju poziomym komory są jednakowe;
10. Wpływ wilgotności powietrza na jego gęstość jest nieistotna;
11. Porowatość materiału jest stała;
12. Materiał w komorze jest równomiernie rozłożony;
13. Właściwości materiału w chwili początkowej są w całej komorze jednakowe;
14. Ciepło przenikające przez ściany komory wnika równomiernie do całej elementarnej warstwy;
15. Temperatura powietrza otoczenia jest stała a jej wahania są pomijalne;
16. Zmiana zawartości wody w powietrzu otoczenia jest pomijalna;
17. Czynniki suszący, uchodzący z komory suszenia nie zmienia parametrów powietrza otoczenia.

Dane przyjęte do obliczeń

Przyjęte do obliczeń symulacyjnych wielkości przedstawiono w tabeli 1. Dotyczą one właściwości powietrza i materiału oraz stanowiska weryfikacyjnego. Wartość kroku czasowego określono w oparciu o pojemność cieplną elementarnej warstwy.

Tabela 1. Dane przyjęte do obliczeń symulacyjnych.

Table 1. Data taken for simulation calculations

Parametr	Oznaczenie	Jednostka	Test I	Test II	Test III
			warstwa 20mm	warstwa 80 mm	warstwa 140 mm
Powietrze:					
temperatura otoczenia	t_{ot}	°C	22	21	22
prędkość przepływu	v_g	m/s	0,2	0,2	0,2
temperatura początkowa	t_o	°C	40	40	40
początkowa zawartość wody	x_o	kgH ₂ O/kg s.p	0,0165	0,016	0,0145
gęstość	ζ_g	kg/m ³	1,12	1,12	1,12
ciepło właściwe	c_g	kJ/kg·K	1	1	1
ciśnienie atmosferyczne	P_{AT}	Pa	101325	101325	101325
Materiał (nasiona seradeli):					
temperatura początkowa	t_m	°C	22	21	22
początkowa zawartość wody	u_o	kgH ₂ O/kg s.m	0,27	0,27	0,27
gęstość usypowa	ζ_u	kg/m ³	392	392	392
gęstość	ζ	kg/m ³	812	812	812
porowatość warstwy	ϵ	-	0,517	0,517	0,517
czynniki kształtu	ϕ_k	m ² /m ³	1,22	1,22	1,22
średnica zastępcza	d_e	m	0,00213	0,00213	0,00213
ciepło właściwe	c_m	kJ/kg·K	2,4	2,4	2,4
Komora suszenia:					
średnica suszarki	ED	m	0,28	0,28	0,28
temperatura sita I	ts_1	°C	22	21	22
masa sita	M	kg	0,7	0,7	0,7
temperatura sita II	ts_2	°C	22	21	22
współczynnik wnikania ciepła do sita	α_s	kJ/m ² ·s.k	0,21	0,21	0,21
współczynnik przenikania ciepła przez ściankę	Kb	J/m s.k	15	15	15
masa ścian bocznych	Mb	kg	0,04	0,04	0,04
ciepło właściwe ścian bocznych	c_b	kJ/kg·K	1,8	1,8	1,8
współczynnik wnikania ciepła do ścian bocznych	α_b	J/m ² ·s.k	117	117	117
ciepło właściwe sita	c_s	kJ/kg·K	0,5	0,5	0,5
warstwa sita II	n_s	-	1	31	61
Inne:					
krok czasowy	$\Delta\tau$	min.	0,5	0,5	0,5
elementarna warstwa	g	m	0,002	0,002	0,002
czas suszenia	τ	min.	140	140	140

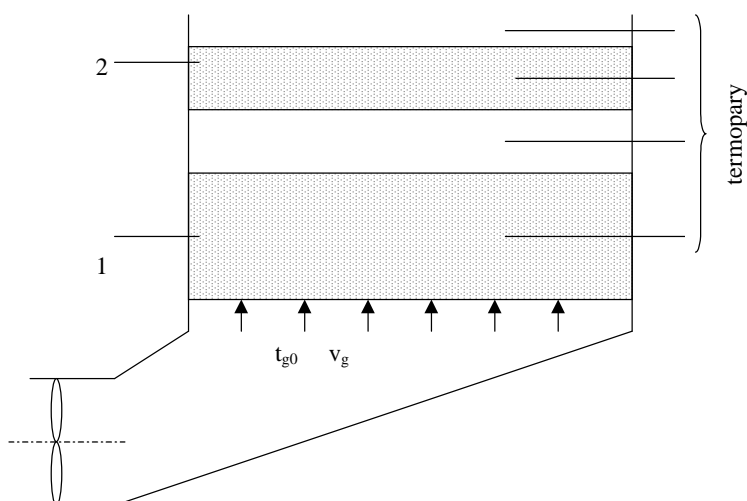
Symulacja procesu

Obliczenia symulacyjne wykonano w oparciu o program napisany w języku TURBO PASCAL 6.0

Wykonano 3 testy symulacyjne dla warstwy nasion o wysokości 20 mm położonej bezpośrednio na sicie dolnym (test 1), 60 mm nad sitem dolnym, przy czym na sicie dolnym znajdowały się również nasiona (test 2) oraz 120 mm nad sitem dolnym, przy czym na sicie dolnym znajdowały się również nasiona (test 3).

Weryfikacja modelu

Weryfikacji obliczeń symulacyjnych dokonano w oparciu o badania wykonane na stanowisku przedstawionym na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat stanowiska do weryfikacji wyników symulacji: 1 – warstwa wstępna, 2 – warstwa ważona

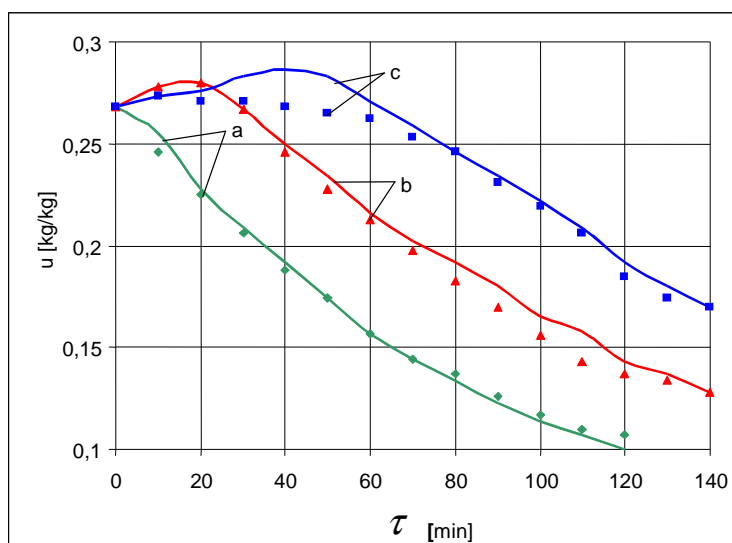
Fig. 2. Diagram of a stand for simulation results verification: 1 – preliminary layer, 2 – weighted layer

Materiał warstwy (2) ważono w czasie trwania procesu, dla określenia bieżącego jego uwilgotnienia. Grubość warstwy ważonej wynosiła 20 mm. Warstwa wstępna miała grubość: 0 mm w doświadczeniu 1, 60 mm w doświadczeniu 2 oraz 120 mm w doświadczeniu 3.

Wyniki symulacji i weryfikacji

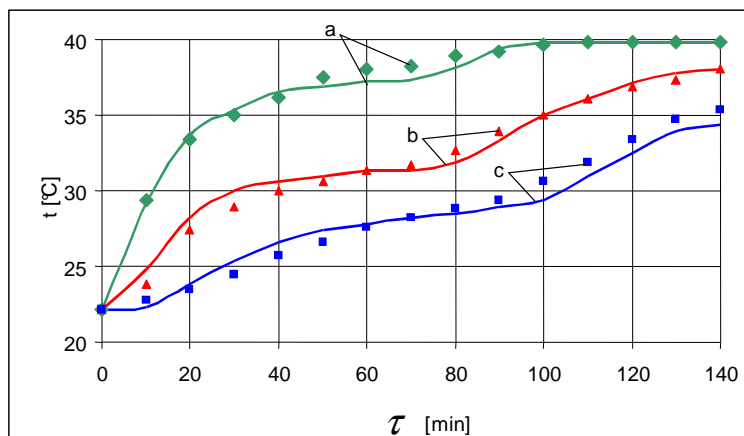
Weryfikacji modelu dokonano poprzez porównanie danych otrzymanych z symulacji z danymi otrzymanymi w wyniku przeprowadzonych doświadczeń. Danymi tymi były: zmiany zawartości wody w materiale (rys. 3) oraz dane dotyczące zmian temperatury powietrza nad warstwą ważoną (rys. 4). Zawartości wody uzyskane z eksperymentów są wartościami średnimi dla warstwy ważonej (20 mm), natomiast wartości obliczone uzyskano obliczając średnią zawartość wody 10 warstw elementarnych (2 mm).

Badania dotyczące współczynnika suszarniczego oraz równowagowej zawartości wody u_r przeprowadzono do wilgotności 90%, dlatego też w modelu założono, że gdy wilgotność powietrza przekroczy 90% nie następuje suszenie według równania 3, lecz wtórne nawilżanie według równania 4. Stąd krzywe suszenia otrzymane w wyniku symulacji odbiegają w pewnych przedziałach od wyników doświadczeń weryfikacyjnych. Rozszerzenie zakresu ważności równań opisujących współczynnik suszarniczy K i równowagową zawartość wody u_r powyżej 90% dałoby lepszą zgodność przebiegów, gdyż nie byłoby konieczności korzystania z równania bilansowego 4.



Rys. 3. Weryfikacja wyników symulacji. Średnia zawartość wody w warstwie. Położenie warstwy: a – (0 – 20) mm, b – (60 – 80) mm. c – (120 – 140) mm. Linia ciągła – symulacja. Punkty – weryfikacja

Fig. 3. Simulation results verification. Average water content in a layer. Layer position: a – (0 – 20) mm, b – (60 – 80) mm. c – (120 – 140) mm. Continuous line – simulation. Dots – verification.



Rys. 4. Weryfikacja wyników symulacji. Temperatura powietrza za warstwą: Położenie warstwy: a – 20 mm, b – 80 mm, c – 140 mm. Linia ciągła – symulacja. Punkty – weryfikacja.

Fig.4. Simulation results verification. Air temperature beyond the layer: Layer position: a – 20 mm, b – 80 mm, c – 140 mm. Continuous line – simulation. Dots – verification

Wnioski

1. Zaproponowany model, bazujący na bilansie energii i masy pozwala na symulację rozkładu temperatury i wilgotności materiału oraz temperatury i wilgotności względnej powietrza w trakcie suszenia.
2. Weryfikacja modelu podczas suszenia nasion seradeli wykazała dobrą zbieżność danych obliczonych i eksperymentalnych.

**MATHEMATICAL MODELLING OF DRYING PROCESS
IN A FIXED BED.
PART II. MODEL VERIFICATION**

Summary

The paper presents results of drying process simulation for serradilla sowable material, compared to empirical data. In order to make calculations, experiments were carried out, in which drying coefficient K and balance water content u_r values were determined in relation to air temperature and relative humidity. The model verification during serradilla sowable material drying proved good convergence of calculated and experimental data.

Key words: mathematical model, drying in a fixed bed, verification, serradilla.