

*Bogusława Łapczyńska-Kordon, Zbigniew Ślipek  
Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki  
Akademia Rolnicza w Krakowie*

## ZASTOSOWANIE MODELOWANIA ROZMYTEGO DO OPISU ODKSZTAŁCEŃ W CZASIE KONWEKCYJNEGO SUSZENIA

### Streszczenie

W pracy przedstawiono wykorzystanie teorii zbiorów rozmytych do modelowania zmiany odkształceń próbek ziemniak a podczas suszenia konwekcyjnego. Do opisu zmian odkształceń w czasie suszenia zastosowano model Mamdaniego. Jako zmienne lingwistyczne przyjęto czas suszenia  $X$  ( $We$ ) i odkształcenie  $Y$  ( $Wy$ ), które poddano procesowi rozmywania. Do obliczeń funkcji przynależności wybrano trójkątną symetryczną funkcję. Model został poprawnie zweryfikowany, co potwierdziły wartości błędów: lokalnego (0,14%) i globalnego (0,02%).

**Słowa kluczowe:** model, zbiory rozmyte, odkształcenia, ziemniak

### Wstęp

W modelowaniu matematycznym procesów suszenia istotne znaczenie ma opis skurczu suszarniczego. Wymaga to doświadczalnego wyznaczenia odkształceń materiału, a następnie sformułowania ich zmian w funkcji zawartości wody lub/i temperatury.

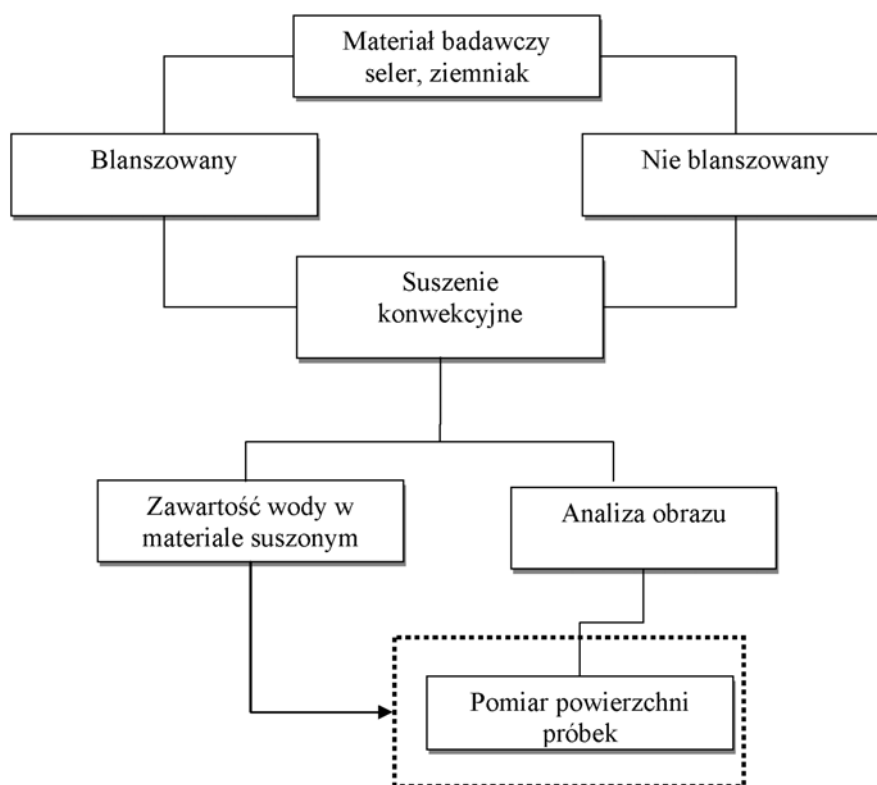
Matematyczne modele tworzone na bazie wyników pomiarowych można formułować za pomocą metod statystycznych jako modele regresyjne, względnie strukturalne tworzone przy wykorzystaniu estymacji nieliniowej. Modele te wymagają dużej ilości informacji, a ponadto wyniki pomiarów są obciążone znacznym błędem. Przetwarzaniem informacji nieprecyzyjnych zajmuje się teoria zbiorów rozmytych [Piegat 2003]. Dotychczas w zagadnieniach inżynierii rolniczej teoria ta była wykorzystywana między innymi w modelowaniu sterowania procesu przechowywania ziemniaków [Wachowicz, Pułaczewski 1994] oraz do prognozowania sprzedaży energii elektrycznej odbiorcom wiejskim [Trojanowska, Małopolski 2004].

Zaletą modeli tworzonych na bazie logiki rozmytej jest możliwość ich formułowania w oparciu o znacznie mniejszą liczbę informacji w porównaniu z modelami konwencjonalnymi.

Celem pracy była próba zastosowania logiki i wnioskowania rozmytego do opracowania modelu zmian odkształceń próbek w czasie suszenia konwekcyjnego warzyw.

### Metodyka badań

Badania przeprowadzono na próbkach ziemniaka i selera - nie blanszowanych i blanszowanych w gorącej wodzie (90°C). Kostki (10x10x10 mm) suszono w suszarce konwekcyjnej z wymuszonym obiegiem powietrza. Podczas suszenia oceniano zmianę powierzchni próbek, jako miary odkształceń, przy pomocy komputerowej analizy obrazu.

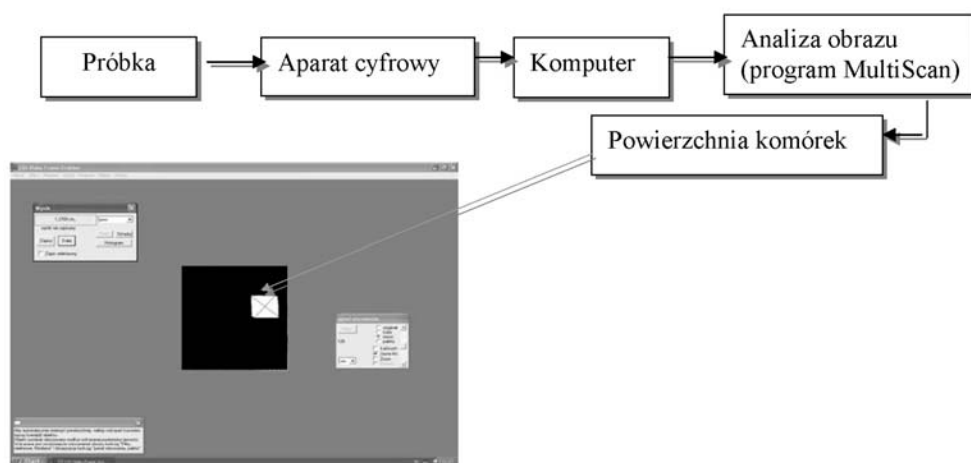


Rys. 1. Schemat procedury badawczej

Fig. 1. Diagram of test procedure

## Komputerowa analiza obrazu

Odształcenia materiału w czasie suszenia były rejestrowane za pomocą aparatu cyfrowego. Analizę obrazów wykonano w programie MultiScan v.08.96. Zdjęcia z obrazami powierzchni próbek odpowiadającym określonym chwilom czasowym poddano filtrowaniu wystrzajacemu i binaryzacji z histerezą.



Rys. 2. Procedura analizy obrazu

Fig. 2. Procedure of image analysis

Odształcenia próbek zostały określone według następującej zależności:

$$\Delta A = A_0 - A(\tau) \quad (1)$$

gdzie:

- $A(\tau)$  – powierzchnia próbki w danej chwili [ $\text{mm}^2$ ],
- $A_0$  – początkowa powierzchnia próbki [ $\text{mm}^2$ ].

## Model rozmyty

Do opisu zmian odształceń w czasie suszenia zastosowano model Mamdaniego. Modelowanie składa się z trzech etapów: rozmywania, wnioskowania lingwistycznego, wystrzania. Jako zmienne lingwistyczne przyjęto:

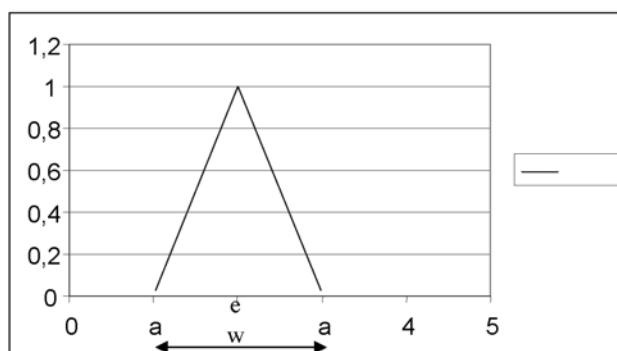
- czas suszenia X ( $W_e$ ),
- odształcenie Y ( $W_y$ ).

Wybrano trójkątną symetryczną funkcję przynależności  $\mu(x)$  obliczaną według wzoru:

$$\mu(x) = w \left( \frac{a - |x - e|}{a} \right) \quad (2)$$

gdzie:

- a – współrzędne wierzchołków podstawy trójkąta,
- e – współrzędna środka podstawy trójkąta,
- x – zmienna,
- w – wartość logiczna.



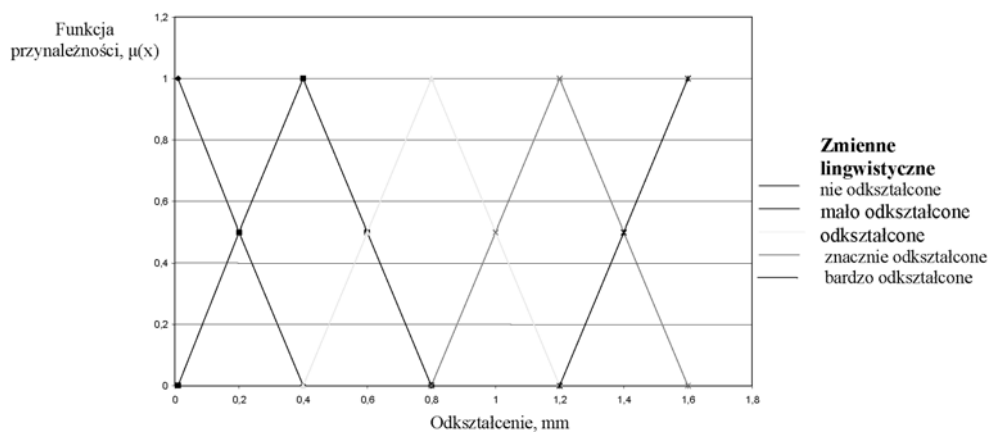
Rys. 3. Wartość modalna

Fig. 3. Modal value

Zmienna logiczna przyjmuje następujące wartości:

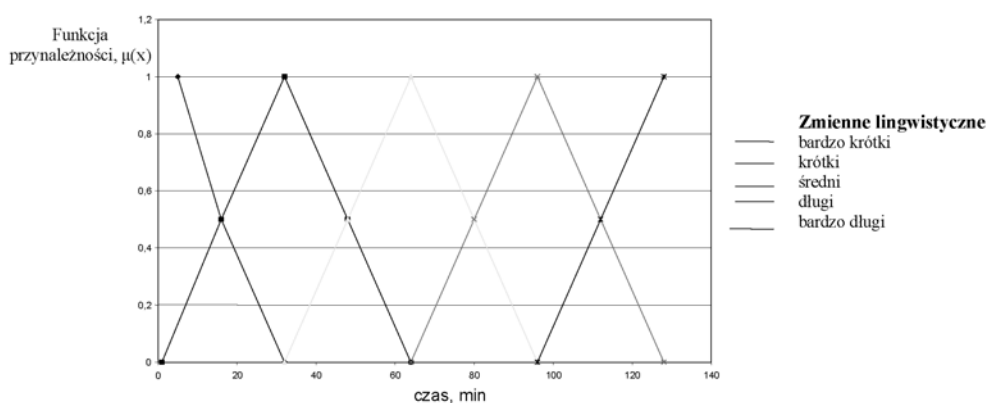
$$w = \begin{cases} 1 & \text{gdy } (e - a) \leq x < (e + a) \\ 0 & \text{poza w/w przedziałem} \end{cases} \quad (3)$$

Przebieg funkcji przynależności dla zmiennej  $y$  określającej odkształcenia przedstawiono na rysunku 4, a dla zmiennej  $x$  – czasu na rysunku 5. Funkcje te zostały obliczone według równania (2).



Rys. 4. Funkcja przynależności dla odkształceń

Fig. 4. Adherence function for deformations



Rys. 5. Funkcja przynależności dla czasu

Fig. 5. Adherence function for time

## Proces rozmywania

Punkty charakterystyczne dla zmiennych  $x$  i  $y$ , będące końcami przedziałów zmiennych w procesie rozmywania, przedstawiono w tabeli 1.

*Tabela.1. Punkty rozmyte (charakterystyczne) zmiennych X i Y*  
*Table 1. Fuzzy (characteristic) points of variables X and Y*

X [min]	5	32	64	96	128
Y [mm]	0,01	0,4	0,8	1,2	1,6

Model rozmyty sformułowano w oparciu o następujące reguły wnioskowania Mamdaniego:

R1: Jeśli (x około 5) to (y około  $y_1$ )

R2: Jeśli (x około 32) to (y około  $y_2$ )

R3: Jeśli (x około 64) to (y około  $y_3$ )

R4: Jeśli (x około 96) to (y około  $y_4$ )

R5: Jeśli (x około 128) to (y około  $y_5$ )

Gdzie:  $y_1=0,01$ ,  $y_2=0,4$ ,  $y_3=0,8$ ,  $y_4=1,2$ ,  $y_5=1,6$

Stosując zmienną logiczną możemy określić wzory na poszczególne funkcje przynależności wejścia x:

$$\mu_1(x) = \frac{(16 - |x - 1|)}{16}$$

$$\mu_2(x) = \frac{(16 - |x - 1|)}{16} + \frac{(16 - |x - 32|)}{16}$$

$$\mu_3(x) = \frac{(16 - |x - 1|)}{16} + \frac{(16 - |x - 32|)}{16} + \frac{(16 - |x - 64|)}{16}$$

$$\mu_4(x) = \frac{(16 - |x - 1|)}{16} + \frac{(16 - |x - 32|)}{16} + \frac{(16 - |x - 64|)}{16} + \frac{(16 - |x - 96|)}{16}$$

$$\mu_5(x) = \frac{(16 - |x - 1|)}{16} + \frac{(16 - |x - 32|)}{16} + \frac{(16 - |x - 64|)}{16} + \frac{(16 - |x - 96|)}{16} + \frac{(16 - |x - 128|)}{16}$$

Wzór na wyjście modelu w całej przestrzeni rozważań  $5 \leq x \leq 128$  na postać:

$$y = y_1 \left[ \frac{(16 - |x - 1|)}{16} \right] + y_2 \left[ \frac{(16 - |x - 1|)}{16} + \frac{(16 - |x - 32|)}{16} \right] +$$

$$y_3 \left[ \frac{(16 - |x - 1|)}{16} + \frac{(16 - |x - 32|)}{16} + \frac{(16 - |x - 64|)}{16} \right] +$$

$$y_4 \left[ \frac{(16 - |x - 1|)}{16} + \frac{(16 - |x - 32|)}{16} + \frac{(16 - |x - 64|)}{16} + \frac{(16 - |x - 96|)}{16} \right] +$$

$$y_5 \left[ \frac{(16 - |x - 1|)}{16} + \frac{(16 - |x - 32|)}{16} + \frac{(16 - |x - 64|)}{16} + \frac{(16 - |x - 96|)}{16} + \frac{(16 - |x - 128|)}{16} \right]$$

Na podstawie powyższych formuł matematycznych można wyprowadzić wzory interpolacyjne dla sektorów powierzchni pomiędzy poszczególnymi charakterystycznymi punktami modelu:

$$w_1 = \begin{cases} 1 & \text{gd}y 1 \leq x < 32 \\ 0 & \text{gd}y x \notin [1;32) \end{cases}$$

$$w_2 = \begin{cases} 1 & \text{gd}y 32 \leq x < 64 \\ 0 & \text{gd}y x \notin [32;64) \end{cases}$$

$$w_3 = \begin{cases} 1 & \text{gd}y 64 \leq x < 96 \\ 0 & \text{gd}y x \notin [64;96) \end{cases}$$

$$w_4 = \begin{cases} 1 & \text{gd}y 96 \leq x < 128 \\ 0 & \text{gd}y x \notin [96;128) \end{cases}$$

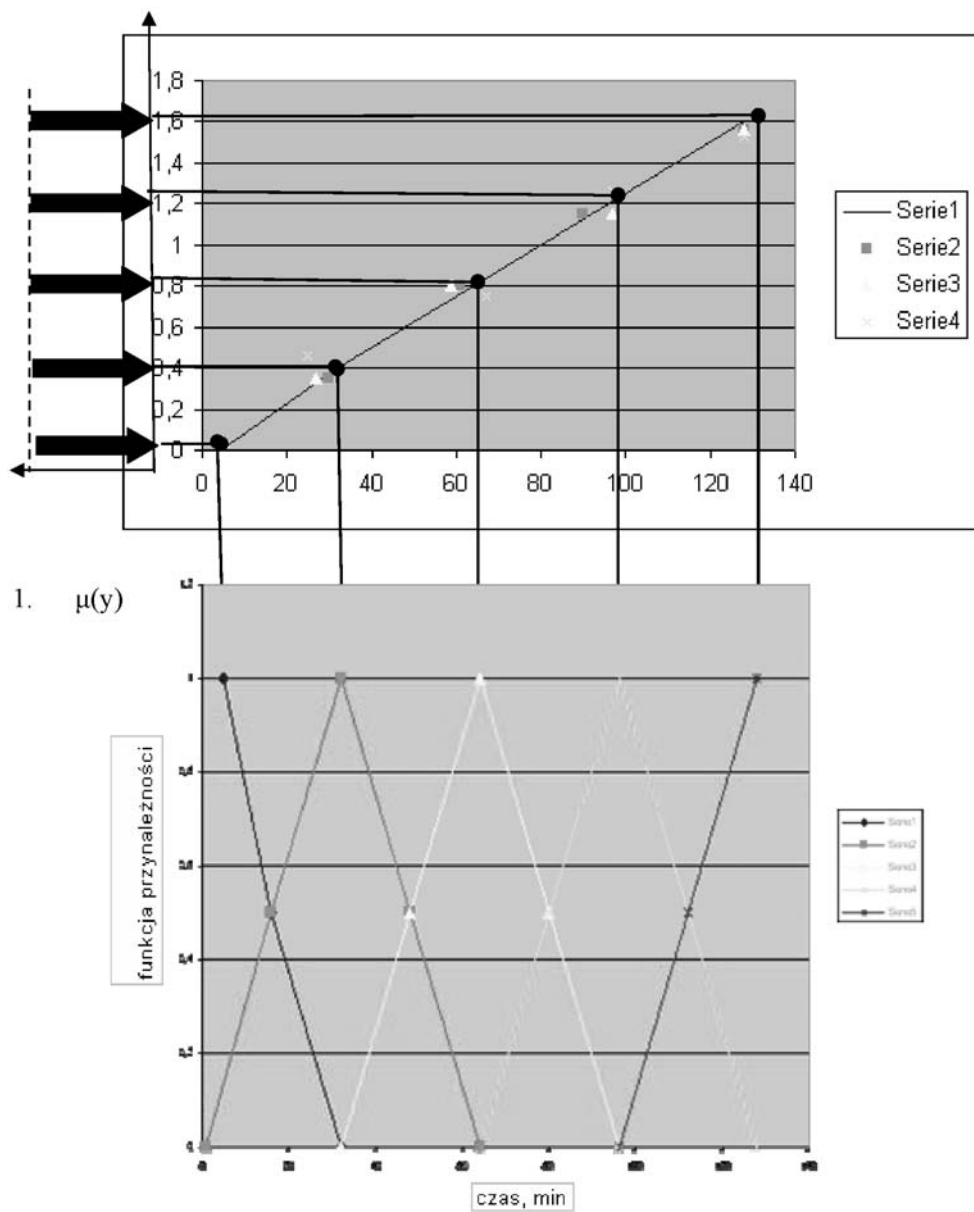
Na funkcje interpolacyjne modelu między jego punktami podparcia  $R_i$ - $R_{i+1}$  wpływają jedynie parametry punktów rozpatrywanych na granicy rozpatrywanego sektora. Efekt taki uzyskano, dzięki użyciu funkcji przynależności wejścia, które w punkcie wartości modalnej sąsiedniej funkcji przynależności mają wartość zerową.

$$R_1-R_2: a_1=16, \quad y = y_1 \frac{(16 - |x - 1|)}{16} + y_2 \frac{(16 - |x - 32|)}{16}$$

$$R_2-R_3: a_2=16, \quad y = y_2 \frac{(16 - |x - 32|)}{16} + y_3 \frac{(16 - |x - 64|)}{16}$$

$$R_3-R_4: a_3=16, \quad y = y_3 \frac{(16 - |x - 64|)}{16} + y_4 \frac{(16 - |x - 96|)}{16}$$

$$R_4-R_5: a_4=16, \quad y = y_4 \frac{(16 - |x - 96|)}{16} + y_5 \frac{(16 - |x - 128|)}{16}$$



Rys. 6. Model rozmyty odkształcenia w zależności od czasu suszenia  
 Fig. 6. Fuzzy model of deformation as a function of drying time



Dokładność modelu została wyznaczona metodą analizy błędów:

$$\text{Średni błąd lokalny względny } \delta_l = \left| \frac{u_{pomi} - u_{obli}}{u_{pomi}} \right| \cdot 100 = 0,14\%$$

$$\text{Średni błąd globalny względny, } \delta_g f(u) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [u_{pomi} - u_{obli}]^2}{\sum_{i=1}^n u_{pomi}^2}}$$

Wartości tych błędów wskazują, że opracowany model może być stosowany do opisu zmian odkształceń w trakcie konwekcyjnego suszenia ziemniaka.

### Wnioski

1. Wraz z upływem czasu suszenia rośnie odkształcenie próbek ziemniaka.
2. Model rozmyty oparty na wnioskowaniu Mamdaniego, z zastosowaną trójkątną funkcją przynależności poprawnie opisuje zależność odkształcenia próbek ziemniaka od czasu.
3. W procedurze weryfikacji modelu stwierdzono, że błąd względny lokalny wyniósł 0,14 %, a błąd globalny – 0,02 %

### Bibliografia

Piegat A. 2003. Modelowanie i sterowanie rozmyte. Akadem. Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.

Trojanowska M., Małopolski J. 2004. Zastosowanie metod sztucznej inteligencji do prognozowania miesięcznej sprzedaży energii elektrycznej na wsi. Acta Scientiarum Polonorum. Technica Agraria, 3 (1-2).

Wachowicz E., Pułaczewski J. 1994. Fuzzy logic contro land weather forecast for energy – efficient potato storage. Proc. The third IEEE Conferenc On Control Applications, Glasgow.

## **APPLICATION OF FUZZY MODELING FOR DESCRIPTION OF DEFORMATIONS DURING CONVECTION DRYING**

### **Summary**

The paper presents the use of the fuzzy set theory for modeling a change in deformation of potato samples during convection drying. For description of deformation changes during drying process the Mamdani model was applied. As linguistic variables drying time  $X$  (In) and deformation  $Y$  (Out) were adopted, which were subjected to fuzziness process. For calculation of adherence function a triangular symmetrical function was selected. The model was verified correctly, which was proven by values of local (0,14%) and global error (0,02%).

**Key words:** model, fuzzy sets, deformations, potato